AUTORIDAD DE CARRETERAS Y TRANSPORTACION

CORREDOR HATILLO - AGUADILLA

DECLARACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

APÉNDICES

VOLUMEN III

C. Evaluaciones Geológicas

D. Estudio Hidrogeológico

AGOSTO 2010

Departamento de Transportación y Obras Públicas

REPORT

GEO ENGINEERING

SERVICIOS GEOTÉCNICOS Y GEOLÓGICOS PARA ACTUALIZAR LA DIA PRELIMINAR

CORREDOR HATILLO - AGUADILLA

HATILLO-AGUADILLA, PUERTO RICO

Consulting
Geotechnical
Engineers

PO Box 270328
San Juan
PR, 00927
T. 787.781.6340
F.787.706.0183

Preparado para

RAY Architects and Engineers
San Juan, PR

18 de agosto de 2010

Pedro Ray, PE
Presidente, RAY Architects and Engineers
Calle Tetuán # 355
Viejo San Juan, Puerto Rico 00901
Tel. 787-725-5252, Fax 787-723-5445

Re: Servicios Geotécnicos y Geológicos para
Actualizar la DIA Preliminar
Corredor Hatillo-Aguadilla
Hatillo-Aguadilla, Puerto Rico
(GEO-731-2010)

Estimado ingeniero Ray:

Le estamos sometiendo el informe de la evaluación geotécnica y geológica adicional del proyecto en referencia. En caso de cualquier pregunta al respecto, no dude en comunicarse con nosotros. Nos ponemos a su disposición para reunirnos con usted o su representante para discutir o aclarar cualquier duda concerniente a esta evaluación.

Le damos las gracias por habernos dado la oportunidad de llevar a cabo este estudio.

Cordialmente,
GEO-Engineering

Carlos E. Rodríguez Pérez, PhD, PE
Ingeniero Geotécnico

Anejos

\\nas-01-d5-c3\Suelos-Projects\GEO 731-2010 - Serv. Geotécnicos y Geológicos - Corredor Hatillo-Aguadilla-PR-22\Reporte Revisado -731-28jul10\Informe 2a REVISIÓN-Corredor Hatillo-Aguadilla-GEO 731-18agos10.docx

Tabla de Contenido

Sección UNA **Introducción**

1.1 INTRODUCCIÓN 1-1

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO 1-1

1.3 ANTECEDENTES 1-2

Sección DOS **Información Geológica y Evaluación**

2.1 ESCENARIO GEOLÓGICO 2-1

2.1.1 Geología General de Puerto Rico 2-1

2.1.2 Geología a lo largo del Corredor Propuesto 2-5

2.1.3 Sumideros 2-11

2.1.4 Sismicidad 2-14

2.1.5 Exploración de Suelo 2-15

2.1.6 Hidrogeología del Área General del Proyecto 2-20

2.1.7 Cortes 2-23

2.1.8 Pozos Sépticos 2-25

Sección TRES **Conclusiones**

3.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES 3-1

Sección CUATRO **Comentarios Generales**

4.1 COMENTARIOS GENERALES 4-1

FIGURAS

APÉNDICES

Apéndice 1 Informe Geológico de GeoCim

Apéndice 2 Registro de Barrenos y Resultados de Pruebas de Laboratorio

1.1 INTRODUCCIÓN

El siguiente informe presenta la evaluación geotécnica y geológica adicional para actualizar la DIA Preliminar (DIA-P) del proyecto del Corredor Hatillo-Aguadilla (Corredor) de la Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico (ACT). El ingeniero Pedro Ray, Presidente de Ray Architects and Engineers (Ray), San Juan, firma encargada de la preparación de la DIA Preliminar Actualizada (DIA-PA), solicitó la evaluación a nombre de la ACT.

La evaluación geotécnica y geológica adicional está basada en los resultados de la evaluación geológica preparada por otros para este proyecto (copia de la cual se incluye en el Apéndice 1), en información de suelo y roca obtenida a través de diez barrenos realizados a lo largo del Corredor, en información obtenida por medio de un reconocimiento de campo detallado y en información recopilada de fotografías aéreas del sitio y sus alrededores. Se recuperó muestras de suelos y rocas por medio de los barrenos, las cuales fueron sometidas a pruebas de laboratorio para obtener información sobre las características de los suelos y rocas del lugar del proyecto.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

La Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico (ACT) considera extender la autopista José De Diego (PR-22) desde Hatillo hasta Aguadilla, PR. El proyecto propuesto consiste en la construcción a campo traviesa de un tramo de carretera de cuatro carriles (dos en cada dirección) con una longitud

aproximada de 46 kilómetros. La carretera contará con una isleta central y paseos laterales por lo que requerirá una servidumbre mínima de aproximadamente 90 metros de ancho. El tramo de carretera propuesto comenzará en el kilómetro 81.2 de la carretera estatal PR-22 en el municipio de Hatillo, PR y se extenderá hasta el kilómetro 130.9 de la carretera estatal PR-2 en el municipio de Aguadilla, PR (Fig. 1). La trayectoria general del proyecto propuesto es en la dirección oeste-suroeste, atravesando los municipios de Hatillo, Camuy, Quebradillas, Isabela, Moca y Aguadilla.

El tramo de carretera propuesto comienza al sur de la estación de peaje de Hatillo de la carretera estatal PR-22. El tramo propuesto cruza varias carreteras estatales (e.g. PR-130, PR-486, PR-482, etc.), el cauce de los ríos Camuy y Guajataca y de la Quebrada La Sequía y varios canales de riego. La trayectoria del proyecto incluye un sector dentro de la topografía accidentada de la Cordillera Jaicoa y de los Cerros Viñet en Aguadilla, PR. Al final, el tramo de carretera propuesto cruza parte del valle aluvial del río Culebrinas hasta alcanzar la carretera estatal PR-2 en la estación 462+46.50 en el Barrio Espinar de Aguadilla, PR. En su mayoría, la trayectoria general del tramo propuesto es cuasi-paralela a la trayectoria general de la carretera estatal PR-2, la cual discurre al norte y oeste del tramo de carretera propuesto.

1.3 ANTECEDENTES

Como parte de una Declaración de Impacto Ambiental Preliminar (DIA-P) sometida por la ACT en mayo de 2007, se incluyó una evaluación geológica del

proyecto propuesto. La evaluación fue preparada en mayo de 2006 por el geólogo Alejandro E. Soto de la firma GeoCim.

La evaluación geológica contiene una descripción detallada de las condiciones topográficas de la ruta propuesta para el proyecto, una descripción de la geología del "Karso" del Norte de Puerto Rico, una descripción detallada de las condiciones geológicas del terreno a lo largo del Corredor, y una sección de conclusiones y recomendaciones que incorporan comentarios sobre la hidrogeología del área del proyecto y el efecto de la presencia de cuevas, sumideros de colapso, deslizamientos y fallas geológicas en el área general del proyecto.

En su Resolución Interlocutoria sobre el proyecto, fechada el 12 de agosto de 2009, la Junta de Calidad Ambiental (JCA) solicitó a la Agencia Proponente (la ACT) que presentara una Declaración de Impacto Ambiental Preliminar Actualizada (DIA-PA) que incluyera, entre otras cosas, la siguiente información asociada con la evaluación geológica incluida en la DIA-P:

1. Pruebas de percolación y localización del nivel freático en las áreas propuestas para la disposición de las aguas usadas a ser generadas en las estaciones de peaje.
2. Realizar "un Estudio Geotécnico detallado que tome en consideración los sumideros, cuevas y cavernas que rodean el corredor propuesto".
3. Estudiar "las fallas geológicas que circundan el corredor y determinar la(s) acción(es) a tomarse para que el corredor no se afecte".
4. Analizar "cómo será el drenaje en el corredor en las áreas geológicamente susceptibles como sumideros".

5. Estudiar “las áreas de deslizamiento de terreno y qué acción(es) se tomará(n) para que no se afecte el corredor”.
6. Tener “en cuenta la posibilidad de deslizamientos de terreno, inestabilidad de fallas o sumideros si se usara explosivos durante la construcción del corredor”. “En caso de utilizar explosivos, deberán discutir dicha actividad, identificar las áreas probables” en que se podría requerir el uso de explosivos, el impacto de dicha actividad y “las medidas que se tomarán para disminuir cualquier impacto”.

Luego de realizar una evaluación de la DIA-P sometida por la ACT, el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico (DRNA) sometió comentarios en su comunicación del 25 de septiembre de 2007 en los cuales señala la necesidad de llevar a cabo una evaluación geotécnica que sirva de base para auscultar la posibilidad de que el concepto de relocalización de sumideros sea técnicamente viable, que los sumideros impactados por el proyecto no corran el riesgo de colapsos futuros, y que se incluya una discusión específica de las fallas geológicas previamente identificadas en un sector del proyecto.

La presente evaluación geotécnica y geológica adicional tiene el propósito de atender los planteamientos hechos por las agencias gubernamentales a la evaluación geológica previa incluida en la DIA-P. Para ello fue necesario realizar estudios adicionales de campo y un programa de exploración de suelos y pruebas de laboratorio que permitieran obtener información adicional sobre los suelos y rocas del área general de la ruta del proyecto. Los resultados de la evaluación adicional han sido incorporados en el presente informe, el cual es una adenda del informe sobre la evaluación geológica sometido en la DIA-P. El

presente informe incorpora, resume y/o modifica algunas secciones del informe geológico original con el propósito antes descrito.

2.1 ESCENARIO GEOLÓGICO

2.1.1 Geología General de Puerto Rico

Puerto Rico se originó a través de erupciones volcánicas que dieron lugar a la formación de islas pequeñas. Actividades tectónicas y volcánicas posteriores junto con el desarrollo de sedimentación, fallamiento y plegamiento intensos dieron origen al espinazo montañoso que actualmente forma la Cordillera Central de la isla. La Cordillera Central consiste mayormente de rocas volcánicas (e.g. limolita, arenisca, brecha, toba, etc.) altamente plegadas y con mucho fallamiento y rocas ígneas intrusivas. Las rocas volcánicas datan del Cretácico, mientras las rocas ígneas intrusivas datan del Terciario o del Cretácico superior.

Durante el Terciario medio al superior, se acumuló una secuencia de sedimentos al norte y sur del espinazo montañoso, como resultado de varias regresiones (retiradas) y trasgresiones (avances) del mar. Estos sedimentos dieron origen a las formaciones de caliza que actualmente constituyen las plataformas carbonatadas que se encuentran al norte y sur de la isla.

La Figura 2 (la cual es copia de la Fig. 3 del informe de GeoCim) muestra un mapa geológico general de la distribución de la plataforma carbonatada del norte de Puerto Rico. Esta plataforma se extiende en la dirección este desde Rincón hasta Loíza. La Figura 3 (publicada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS, en el informe “Water-Resources Investigation Report 94-4249) muestra una sección esquemática en dirección este-oeste de la secuencia de las

formaciones de caliza contenidas en la plataforma carbonatada del norte. En forma ascendente, la secuencia de estas formaciones es la siguiente: Caliza Lares (Tl), Arena Mucarabones (Tm), Formación Cibao (subdividida en varias unidades secundarias o Miembros, tales como Tcu, Tcm, Tcq y Tcr), Caliza Aguada (Ta), Caliza Aymamón (Tay) (en ocasiones subdividida en miembros superior e inferior) y Formación Camuy (Caliza Quebradillas) (Tca) (subdividida también en varias unidades secundarias). De acuerdo a la sección de la Figura 3, el espesor de la plataforma carbonatada del norte tiende a disminuir hacia el este de Puerto Rico y a ser más gruesa hacia la parte central de la isla. El espesor de la plataforma puede sobrepasar los 600 metros. El informe geológico de GeoCim incluye una descripción detallada de las rocas que componen cada una de las formaciones.

El desarrollo de levantamientos que ocurrieron hace millones de años y de cambios en el nivel del mar (especialmente los cambios que ocurrieron durante el Pleistoceno) dejaron expuestas las montañas de la Cordillera Central y las plataformas carbonatadas del norte y sur de la isla. El levantamiento provocó que las plataformas se inclinaran ligeramente hacia el mar. Al presente, la plataforma carbonatada del norte tiene una orientación general de este a oeste y buza en la dirección norte (hacia el mar) con ángulos de inclinación que varían de dos grados cerca de la costa a cinco y seis grados en la parte montañosa. La Figura 4 (la cual es copia de la Fig. 4 del informe de GeoCim) muestra la inclinación de la plataforma en una sección geológica generalizada trazada en la dirección norte-sur.

Plegamiento y fallamiento desarrollados en el área oeste cambiaron la orientación y la inclinación de las formaciones de caliza en esta área. Al

presente, las formaciones de caliza en el área de la Cordillera Jaicoa se encuentran orientadas aproximadamente en la dirección norte-sur y buzan hacia el oeste con ángulos de inclinación variables.

El nivel freático prevaleciente en tiempos pasados provocó la disolución (proceso químico) de la caliza de las formaciones a lo largo de zonas específicas, tales como aquellas que fueron afectadas en mayor medida por la fracturación de la roca. Los cambios relativos en el nivel del mar condujeron en ocasiones a disolución adicional de las calizas y al desarrollo de erosión interna y externa (proceso mecánico) por aguas de escorrentías y escorrentías percolando a través de las calizas. En otras ocasiones, los cambios en el nivel del mar provocaron la acumulación de sedimentos en hondonadas y valles previamente forjados en las formaciones de calizas. El desarrollo adicional de erosión interna y disolución provocó el agrandamiento de los canales de disolución ya formados en las calizas dando origen a cavidades, cuevas y cavernas, algunas de las cuales colapsaron posteriormente. Según la publicación "Puerto Rican Karst – A Vital Resource" del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Gen. Tech. Report WO-65, la denudación promedio de las calizas fue aproximadamente de 2.75 a 3.86 pulgadas por cada 1,000 años. Las hondonadas resultantes de los colapsos fueron subsiguientemente sedimentadas. En ciertos periodos de tiempo, el proceso de erosión interna debe haber sido más significativo en el agrandamiento de los canales de disolución debido a su condición abrasiva.

Los procesos geomorfológicos anteriores tomaron mucho tiempo en suceder (miles a cientos de miles de años, y probablemente millones de años en algunos casos) y son responsables de la topografía kárstica (cársica) actualmente

presente a lo largo de la porción norte de Puerto Rico (normalmente denominada como la Zona Kárstica del Norte de Puerto Rico). Esta topografía se caracteriza por la presencia de mogotes y colinas cónicas con laderas empinadas y pepinos o colinas alargadas, generalmente separados por planicies ondulantes intermedias o *abras* ("intervening plains) subyacidas por suelo. Los mogotes y pepinos generalmente se encuentran alineados. Gran parte del terreno con topografía kárstica carece de un sistema integrado de drenaje superficial. En ocasiones, las planicies ondulantes intermedias contienen depresiones llamadas sumideros de colapso y cavidades denominadas sumideros de roca, especialmente en aquellas planicies intermedias "ciegas" que se encuentran rodeadas de mogotes o pepinos. Los sumideros de roca normalmente se encuentran localizados al pie de las laderas empinadas de los mogotes.

El proyecto propuesto transcurre a lo largo de la porción oeste de la Zona Kárstica del Norte de Puerto Rico.

Estudios de campo realizados por esta oficina en los pasados veinte años han mostrado que la erosión interna y la disolución que han afectado a las calizas han ocurrido principalmente en capas específicas relativamente finas (aproximadamente de 3 a 15 metros de espesor) dentro de la zona vadosa del terreno (zona no saturada). Estas capas se encuentran separadas de la caliza saturada subyacente por calizas de muy baja permeabilidad de varias decenas a cientos de pies de espesor. Los estudios de campo también han mostrado que las capas de caliza afectadas por la erosión interna y disolución se encuentran consistentemente inclinadas siguiendo la inclinación aproximada de las formaciones de caliza.

En el pasado, el flujo interno del agua de escorrentías percolando a través de las calizas debió haber sido mayor dentro de las capas de caliza afectadas por la presencia de los canales de disolución, debido al aumento en permeabilidad proporcionado por estos canales. Por lo tanto, con el pasar del tiempo (miles a cientos de miles de años, y probablemente millones de años en algunos casos), los procesos químico y mecánico afectando las calizas se incrementaron progresivamente dentro de las capas de caliza ya afectadas por estos procesos. Como resultado, la permeabilidad de las capas de caliza afectadas por disolución y erosión interna ha llegado a ser uno de los factores principales que controla en gran medida el flujo de agua subterráneo dentro de la zona vadosa de las formaciones de caliza localizadas en la parte norte de Puerto Rico. En general, el flujo de agua subterráneo dentro de la zona vadosa ocurre hacia el norte (hacia el mar) (excepto en el área oeste donde el flujo es hacia el oeste debido al efecto del plegamiento ocurrido en esta área) siguiendo la inclinación de las capas afectadas por disolución y erosión interna (la cual es aproximadamente similar a la inclinación de las formaciones de caliza). Este patrón de flujo dentro de la zona vadosa se confirma por el hecho de que escorrentías percolando en sumideros localizados en área de mayor elevación no se manifiestan como agua emanando en áreas de menor elevación localizadas al norte (o al oeste en el área oeste), a menos que las capas de calizas afectadas por disolución y erosión interna afloren en estas áreas.

2.1.2 Geología a lo largo del Corredor Propuesto

El informe geológico de GeoCim incluye una descripción detallada de las condiciones geológicas y topográficas a lo largo del Corredor propuesto. Las

Figuras 5 a 14 muestran las condiciones topográficas generales en varios tramos de la ruta del Corredor propuesto (obtenidas utilizando fotografías aéreas de 1936 y 1993 para mejor percepción). Tal como puede apreciarse en estas figuras, la ruta del Corredor transcurre por áreas de colinas ondulantes de pendientes suaves a moderadas, sectores con topografía accidentada debido a la presencia de cerros con pendientes empinadas, tramos largos de planicies ondulantes y tramos con planicies ondulantes con numerosos sumideros. La ruta atraviesa los cañones profundos de los ríos Camuy y Guajataca y los cursos de quebradas y canales de riego.

En resumen, el terreno a través del cual el Corredor propuesto discurrirá consiste de estratos de roca caliza del Terciario medio a superior y suelos del Cuaternario que localmente cubren el basamento calizo. Debido a que la alineación general del proyecto desde Hatillo hasta el norte de Aguadilla coincide en gran medida con la alineación general este-oeste de las formaciones de caliza de la plataforma carbonatada del norte, solamente las calizas de la Formación Camuy (Caliza Quebradillas) y de la Caliza Aymamón afloran a lo largo de la ruta del Corredor desde Hatillo hasta el norte de Aguadilla. La porción restante del Corredor que discurre hacia el sur de Aguadilla coincide con la alineación que tiene la caliza de la formación Caliza Aguada en esta área, por lo que solamente calizas de esta formación afloran a lo largo de la porción sur del proyecto.

Los suelos del Cuaternario incluyen los Depósitos de Manto (“Blanket deposits”), coluvión, depósitos de deslizamiento y suelo aluvial. Los Depósitos de Manto son los suelos más abundantes a lo largo de la ruta del Corredor. Los Depósitos de Manto son descritos en los mapas geológicos del USGS como mezclas de

arena fina a mediana y arcilla marrón. Tal como se describirá posteriormente en la Sección 2.1.5, los Depósitos de Manto observados y recuperados por medio de los barrenos realizados consisten principalmente de arcilla a arcilla arenosa de color marrón rojizo de consistencia rígida a dura. Debido a su composición arcillosa, la permeabilidad de los Depósitos de Manto a lo largo de la ruta del proyecto es muy baja.

Los Depósitos de Manto provienen de la laterización de arenas depositadas dentro de las hondonadas y valles previamente forjados en las capas de calizas. Los Depósitos de Manto subyacen las planicies ondulantes intermedias (abras) que se encuentran localizadas entre mogotes y pepinos. El espesor de los Depósitos de Manto es variable y depende de la morfología subterránea de la parte superior de las calizas cubiertas por los depósitos. Los Depósitos de Manto han alcanzado espesores de 30 metros en algunos sectores del norte de Puerto Rico. El espesor encontrado con los barrenos realizados para este proyecto sobrepasa los 40 pies en algunos sectores.

Los estudios de campo realizados por esta oficina (mencionados en la Sección 2.1.1) han revelado la presencia de zonas permeables dentro de las calizas de las formaciones Camuy, Caliza Aymamón y Caliza Aguada debido a la presencia de capas con canales de disolución, cavidades, cuevas y cavernas. En la Formación Camuy (Caliza Quebradillas) se ha localizado una de estas zonas varios metros por encima del contacto entre esta formación y la Caliza Aymamón. La zona alcanza 5 a 7 metros de espesor. Dentro de la Caliza Aymamón, se han identificado tres zonas: una a varios metros por debajo del contacto entre esta formación y la Formación Camuy, otra cerca de la parte media del miembro superior de la formación y la tercera a varios metros arriba

del contacto entre la Caliza Aymamón y la Caliza Aguada. Las tres zonas tienen espesores que varían entre 5 a 15 metros aproximadamente. En la Caliza Aguada se han identificado dos zonas permeables: una cerca del contacto con la Caliza Aymamón y la segunda cerca del contacto con la Formación Cibao. El espesor de las dos zonas varía entre 5 y 7 metros aproximadamente. La presencia de las zonas permeables ha sido consistente a lo largo de las formaciones de caliza de la plataforma carbonatada del norte de Puerto Rico.

Las zonas mencionadas han sido esquemáticamente dibujadas en las secciones transversales de las Figuras 15 a 19. Estas secciones fueron trazadas normales a la ruta del Corredor en áreas donde se realizaron varios barrenos (B-1, B-3, B-4 y B-8) y cerca del área por donde la ruta cruza el cañón del río Guajataca. Las secciones fueron dibujadas utilizando la información topográfica y geológica contenida en los mapas geológicos publicados por el USGS, la cual fue verificada en algunos sectores durante el reconocimiento detallado de campo. Como puede verse en las secciones, las zonas permeables coinciden en gran medida con la presencia de hondonadas y cavernas actualmente expuestas (mencionadas en el informe geológico de GeoCim) y con el curso de los ríos Camuy y Guajataca. Estas zonas son responsables del desarrollo de sumideros de colapso dentro de las planicies ondulantes intermedias y de la presencia de muchos de los sumideros de roca del área. La sección de la Figura 19 incluye en forma esquemática el efecto provocado por las fallas geológicas (mencionadas en el informe geológico de GeoCim) en la inclinación de la Caliza Aguada y de la zona permeable identificada dentro de esta formación.

Tal como se menciona en el informe geológico de GeoCim, tres fallas geológicas intersecan la alineación del Corredor propuesto. Estas fallas no pudieron ser

identificadas en el terreno. Según el mapa geológico correspondiente del USGS, movimientos verticales relativos de hasta 30 metros ocurrieron en el terreno debido a las fallas. Además, el mapa geológico indica que cuando menos una de las fallas es responsable por la orientación actual de la costa norte de Aguadilla (hacia el norte-noroeste). Las fallas deben haber ocurrido durante el Terciario y se consideran inactivas ya que no manifiestan evidencia física contundente de movimiento en las áreas cubiertas por los Depósitos de Manto, los cuales fueron depositados durante el Terciario superior y Cuaternario inferior (hace cientos de miles de años). Por lo tanto, las fallas geológicas no representan un peligro sísmico para el proyecto.

El efecto de la presencia de las fallas geológicas se manifestará en las condiciones de la caliza cercana a las fallas. Las rocas presentes en las vecindades de fallas geológicas se encuentran generalmente altamente fracturadas e intemperizadas, condiciones que tendrán que tomarse en cuenta durante la construcción de los cortes que vayan a realizarse en estos sectores.

La ruta del Corredor propuesto atraviesa sectores con coluvión y sectores afectados por deslizamientos. El coluvión más significativo se encuentra acumulado en los desfiladeros de los ríos Camuy y Guajataca. Este coluvión no representa problemas a la construcción del Corredor ya que el cauce de los ríos será atravesado por medio de puentes a ser localizados en la parte superior de los desfiladeros de los ríos. El diseño de la fundación de estos puentes deberá tomar en cuenta la presencia de coluvión en algunos sectores (barreno B-1) y la posible presencia de las zonas permeables dentro de las calizas. Las fundaciones de los puentes deberán colocarse a una distancia a ser estimada para alejarse suficientemente de las caras de los desfiladeros de los ríos y evitar

impartir cargas laterales que puedan causar problemas de estabilidad de las caras.

Existe la posibilidad que durante la construcción del proyecto aparezcan bloques de caliza sueltos de varios metros de tamaño, especialmente en áreas cercanas a los pies de los mogotes. Estos bloques tendrán que ser fragmentados para ser removidos del área de construcción.

La ruta del Corredor atraviesa un sector identificado con depósitos de deslizamiento cerca de las estaciones 440+00 a 446+00. Las fotografías aéreas de años pasados indican la posible presencia de estos depósitos. Sin embargo, durante el reconocimiento de campo del sector, se pudo observar solamente características físicas del terreno que indican el desarrollo de reptación ("creep") llana. Por tal motivo, para el diseño del Corredor se tendrá que llevar a cabo un estudio geotécnico y geológico detallado del área para determinar la magnitud del terreno afectado por el deslizamiento y el tipo de medidas correctivas que haya que construir. El estudio geotécnico/geológico tendrá que incluir la instalación de instrumentación de campo, tales como la instalación de varios inclinómetros y piezómetros o pozos de observación. Si el volumen del terreno afectado por el deslizamiento resulta ser de gran magnitud, la solución al problema puede requerir medidas correctivas costosas. Bajo estas circunstancias, es posible que se requiera la relocalización del Corredor en estos sectores para evitar atravesar los depósitos de deslizamiento. En esta etapa de evaluación no es posible determinar qué tipo de medidas correctivas pueden considerarse ya que dependerá de las elevaciones finales de la carretera propuesta y de los resultados del estudio geotécnico/geológico detallado del

sector. La construcción de un puente para "brincar" el área problemática puede ser una medida a ser considerada para este sector.

2.1.3 Sumideros

Existen dos tipos de sumideros: sumideros de roca y sumideros de colapso. Los sumideros de roca son cavidades o huecos presentes en roca caliza que aflora en el terreno. Estas cavidades están conectadas a las zonas permeables y generalmente sirven de drenes naturales. Varios sumideros de roca fueron observados en las vecindades de la ruta del Corredor al pie de mogotes o en afloramientos de caliza en las planicies ondulantes intermedias (Fig. 20). De acuerdo a lo expresado en la Sección 2.1.2, cualquier escorrentía percolando por los sumideros de roca debe fluir por la zona permeable correspondiente hacia el norte siguiendo la inclinación de la zona permeable. Por lo tanto, las escorrentías naturales fluyendo por un sumidero de roca no deben provocar el desarrollo de nuevos sumideros, a menos que se susciten cambios significativos en las condiciones de drenaje (e.g. la boca del sumidero de roca es obstruido por escombros, vegetación, basura, etc.). Para poder usar algunos sumideros de roca para el drenaje de escorrentías del proyecto será necesario preparar los sumideros para su mejor funcionamiento. La Figura 22 muestra esquemáticamente una forma de preparar los sumideros. La capacidad de cada sumidero de roca a utilizarse tendrá que estimarse por medio de un estudio detallado del mismo.

En caso de que la ruta del Corredor interseque un sumidero de roca, será necesario evaluar las condiciones del sumidero y determinar si el mismo puede

soportar las cargas a ser impuestas por el proyecto. De considerarse que el sumidero es estable, se podrá proceder a preparar el sumidero con mortero con revenimiento bajo ("small slump") instalado a baja presión para evitar que el mortero viaje demasiado dentro de la zona permeable a la cual pertenece el sumidero de roca. Las escorrentías naturales que originalmente drenaban a través del sumidero de roca preparado tendrán que ser encausadas hacia otros puntos de drenaje para su disposición, tal como se describe en la Sección 2.1.6.

Los sumideros de colapso son depresiones que se han desarrollado en la superficie del terreno en las planicies ondulantes intermedias como resultado de erosión interna actuando en los suelos subyacentes. La formación de los sumideros de colapso requiere la presencia de zonas permeables dentro de la roca caliza subyacente, tal como sucede a lo largo de la mayor parte de la ruta del proyecto. Los sumideros de colapso comienzan a formarse cuando en el terreno se desarrolla flujo de agua vertical o lateral (provocado por cambios en el nivel freático del terreno), el cual produce erosión interna del suelo depositado sobre la roca caliza. El suelo erosionado es arrastrado por los canales de disolución y cavidades presentes en la zona permeable. Como resultado de este proceso, se forman cráteres o depresiones dentro del terreno. El tamaño de las depresiones depende del volumen de suelo erosionado. Debido a sus condiciones geométricas, las depresiones acumulan escorrentías durante periodos de lluvia. El agua acumulada dentro de las depresiones tiende a fluir verticalmente y provocar más erosión interna del suelo, por lo que las depresiones tienden a aumentar su tamaño progresivamente.

Con el pasar de los años, los canales de flujo dentro de la zona permeable se tupen y el proceso progresivo de erosión interna se interrumpe. Las depresiones

afectadas por esta condición se van sedimentando con el tiempo, convirtiéndose en depresiones relativamente llanas cuyas paredes tienen poca inclinación (Fig. 21). Las probabilidades de que se reactive naturalmente el flujo de agua interno, y por ende el sumidero de colapso, disminuyen con el tiempo debido al menor volumen de agua acumulado en las depresiones llanas. Las probabilidades disminuyen aún más cuando el terreno sobre la roca caliza es arcilloso (de poca permeabilidad) y de un espesor relativamente considerable (e.g. mayor de 30 a 40 pies) y el nivel freático del área es profundo, como es el caso del terreno por donde discurrirá el proyecto propuesto. Las condiciones de la carretera estatal PR-2 confirman este hecho ya que la carretera discurre al norte y oeste del Corredor propuesto en un ambiente geológico similar. La carretera PR-2 no se ha visto afectada por el desarrollo de sumideros de colapso nuevos o por la reactivación de sumideros de colapso existentes para cuando se construyó la carretera.

Por otro lado, si las condiciones de drenaje interno se alteran, la erosión interna de los suelos puede reactivarse ocasionando un incremento en la profundidad de las depresiones llanas o el desarrollo de nuevas depresiones. Es por ello que las depresiones existentes a lo largo de la ruta del Corredor no deben ser utilizadas para almacenar escorrentías, a menos que las depresiones, o cualquier charca de retención nueva que se excave, sean impermeabilizadas y propiamente preparadas con pozos de inyección, como se indica en la Sección 2.1.6.

2.1.4 Sismicidad

A través de la Red Sísmica de Puerto Rico (RSPR) se intentó obtener información sobre los microsismos que han ocurrido en las áreas del proyecto y áreas vecinas. Sin embargo, no fue posible debido a problemas con la página de la RSPR en la Internet. Recientemente, el 16 de mayo de 2010 ocurrió un sismo de magnitud 5.8 con epicentro localizado a 5 km aproximadamente al sur de la estación 320+00 del proyecto. La profundidad focal aproximada del sismo fue de 113 km, lo cual lo clasifica como un sismo de foco profundo. Los movimientos del terreno provocados por este tipo de sismo tienden a atenuarse más lentamente, por lo que su efecto tiende a sentirse a mayores distancias. Según datos preliminares obtenidos, las aceleraciones medidas en el terreno fueron variables y tal vez hayan sido afectadas por las condiciones de suelo prevalecientes en las áreas de medición. El diseño del Corredor deberá tomar en cuenta los efectos de este sismo (aunque dependerá de la publicación de los resultados de la evaluación del mismo realizada por otros).

Tomando en cuenta las condiciones geotécnicas y geológicas del proyecto, el riesgo principal en el proyecto durante un evento sísmico de gran magnitud es el desarrollo de deslizamientos en los cortes y en los terraplenes a ser construidos para la carretera. La posibilidad del desarrollo de licuación es insignificante debido a la ausencia a lo largo de la ruta del proyecto de arenas limpias (o de poco contenido de finos) sumergidas.

2.1.5 Exploración de Suelo

Se llevó a cabo un programa de exploración de suelos y pruebas de laboratorio que permitieran obtener información adicional sobre los suelos y rocas del área general de la ruta del proyecto. El programa de exploración de suelos consistió de la perforación de diez barrenos a lo largo de la ruta del proyecto. La Figura 23 muestra esquemáticamente la localización de los barrenos. Los barrenos fueron realizados en áreas públicas accesibles al equipo de barrenar y en terrenos privados donde se nos permitió hacer los trabajos. Los barrenos B-3, B-5, B-8, B-9 y B-10 fueron realizados en áreas de planicies ondulantes intermedias. El barreno B-3 se realizó dentro de un sumidero de colapso. El barreno B-2 se realizó cerca del pie de un mogote. La profundidad de los barrenos varió entre 50 y 57 pies. El Apéndice 2 incluye el registro de los barrenos y los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas en muestras de suelo obtenidas durante las operaciones de barrenado.

Seis tipos de depósitos se encontraron con los barrenos: 1) Capa vegetal ("topsoil"), 2) coluvión, 3) Depósitos de Manto, 4) depósitos de la Formación Camuy, 5) depósitos de la formación Caliza Aymamón y 6) depósitos de la formación Caliza Aguada. La capa vegetal consistió principalmente de arcilla marrón oscuro ligeramente orgánica y en ocasiones con fragmentos de caliza. El espesor de la capa varió entre 2 a 4 pies aproximadamente. En el barreno B-7, la capa vegetal contenía raíces y parecía haber estado mezclada con relleno.

El coluvión fue encontrado en el barreno B-1. El coluvión consistió de una mezcla de arcilla marrón rojizo con fragmentos de caliza de consistencia rígida a dura. El coluvión tenía un espesor aproximado de 10 pies y alcanzó una profundidad de 12 pies.

Los depósitos de la Formación Camuy (Caliza Quebradillas) fueron encontrados en el barreno B-1 debajo del coluvión y en los barrenos B-9 y B-10 debajo de los Depósitos de Manto. Los depósitos de la Formación Camuy consistieron de una mezcla marrón claro de arena limosa y limo arenoso ligeramente cementados. La mezcla contenía esporádicamente fragmentos de caliza y bolsillos de arcilla residual marrón.

Los depósitos de la formación Caliza Aymamón fueron encontrados en los barrenos B-3, B-5, B-6 y B-7. El material recuperado consistió de una mezcla de fragmentos de caliza blanca y crema con arena limosa y bolsillos de arcilla residual de color marrón.

Los depósitos de la formación Caliza Aguada fueron hallados en el barreno B-4. El material consistió de una mezcla de fragmentos rosáceos y crema claro con limo arenoso.

Los Depósitos de Manto se encontraron en los barrenos B-2, B-3, B-5, B-8, B-9 y B-10 debajo de la capa vegetal. Los depósitos consistieron de arcilla y arcilla arenosa de color marrón, marrón rojizo y marrón claro. Las arcillas tenían una consistencia rígida a dura. El espesor aproximado de los depósitos en los

barrenos fue de más de 46 pies en el barreno B-2, 46 pies en el barreno B-3, 49 pies en el barreno B-5, más de 48 pies en el barreno B-8, 44 pies en el barreno B-9 y 20 pies en el barreno B-10. Como puede verse, el espesor de estos depósitos es relativamente grande. El barreno B-2 fue realizado cerca del pie de un mogote; sin embargo, no se encontró caliza en este barreno a pesar de que el barreno alcanzó una profundidad de 50 pies. Este hallazgo confirma lo empinado que debe estar la ladera soterrada de la colina adyacente, tal como se refleja en las laderas expuestas.

Varias de las muestras de los Depósitos de Manto contenían nódulos (granos redondeados) oxidados a diferentes profundidades. De igual forma, varias de las muestras eran orgánicas. Los nódulos oxidados generalmente se forman en épocas diferentes en aguas estancadas debido a la precipitación de hierro ocasionada por cambios en el nivel del agua. La presencia de los nódulos oxidados y de muestras de suelo orgánico dentro de los Depósitos de Manto es indicativa de la acumulación de agua en la superficie del terreno por largos periodos de tiempo en épocas pasadas antiguas, y de la presencia de antiguas depresiones en el área.

En el barreno B-5 se encontró una cavidad a la profundidad de 43 pies. Esta cavidad se encontró cerca del contacto entre los Depósitos de Manto y la caliza subyacente. El área deberá ser investigada detalladamente en la etapa de diseño del proyecto para determinar la extensión y estabilidad de la cavidad y su efecto (si alguno) en la construcción de la carretera.

Con el propósito de caracterizar los suelos de los Depósitos de Manto se llevaron a cabo varias pruebas de laboratorio en muestras alteradas recuperadas en los barrenos y en muestras inalteradas obtenidas por medio de muestreadores tipo Shelby. La tabla siguiente resume los resultados de las pruebas de laboratorio:

Barreno	Profundidad (pies)	LL (%)	PI (%)	K (cm/seg)	% Finos	USCS
B-1	50-52	44	22			CL
B-2	4-6	71	38			CH
B-2	13-15	82	47			CH
B-3	6-8	69	41			CH
B-3	43-45	95	60			CH
B-5	4-6	64	30			MH
B-5	47-49	88	56			CH
B-8	6-8	50	27			CH
B-8	43-45	36	19			CL
B-9	8-10	36	22			CL
B-9	28-30	45	27			CL
B-10	8-10	36	21			CL
B-8	23-25				34	
Shelby (B-2)	4.5-5	69	41	$3X10^{-6} – 9X10^{-7}$		CH
Shelby (B-2)	7-7.5	67	40	$2X10^{-7} – 4X10^{-7}$		CH
Shelby (B-3)	5-6	60	29	$4X10^{-7} – 2X10^{-8}$		CH
Shelby (B-3)	6.5-7	83	51	$3X10^{-7} – 4X10^{-7}$		CH
Shelby (B-8)	5-5.5	43	25	$1X10^{-6} – 5X10^{-7}$		CL

Barreno	Profundidad (pies)	LL (%)	PI (%)	K (cm/seg)	% Finos	USCS
Shelby (B-8)	5.5-6	48	25	$1X10^{-7} – 5X10^{-7}$		CL
Shelby (B-8)	6-8	46	22	$5X10^{-8} – 8X10^{-8}$		CL
Shelby (B-9)	4-5	35	21	$4X10^{-7} – 8X10^{-7}$		CL
Shelby (B-9)	5-6	44	23	$8X10^{-7} – 1X10^{-8}$		CL
Shelby (B-9)	7.5-8	30	13	$2X10^{-7} – 6X10^{-8}$		CL
Shelby (B-10)	4-4.5	22	9	$5X10^{-8} – 4X10^{-9}$		CL
Shelby (B-10)	4.5-5	32	17	$1X10^{-6} – 8X10^{-8}$		CLO
Shelby (B-10)	6.5-7	27	15	$5X10^{-7} – 3X10^{-8}$		CL
Shelby (B-10)	7.5-8	26	14	$2X10^{-7} – 6X10^{-7}$		CL

De acuerdo a los resultados de las pruebas de clasificación de suelos, los Depósitos de Manto consisten mayormente de arcillas de alta y baja plasticidad (CH y CL según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, USCS).

La tabla anterior incluye resultados de pruebas de permeabilidad realizadas en las muestras inalteradas recuperadas a diferentes profundidades. Las pruebas de permeabilidad fueron realizadas para determinar el coeficiente de permeabilidad (K) de los Depósitos de Manto, ya que la permeabilidad es una propiedad de los suelos que indica la facilidad con que el agua puede fluir a través del terreno. Los valores muy bajos de K obtenidos confirman que los suelos arcillosos de los Depósitos de Manto tienen una permeabilidad muy baja, por lo que el flujo de agua a través de estos suelos debe ser insignificante.

No se encontró el nivel freático durante el proceso de barrenado, por lo que no fue necesario instalar pozos de observación. Tal como se describe en la siguiente sección, el nivel freático a lo largo de la ruta del proyecto es profundo.

Las condiciones encontradas en cada uno de los barrenos están descritas en los registros incluidos en el Apéndice 2. Las líneas indicando cambio en el tipo de suelo fueron trazadas tomando en cuenta la descripción manual de las muestras recuperadas con los barrenos y los registros de campo. Debido a esto, estas líneas son aproximadas y esquemáticas. Las profundidades mencionadas en este informe se refieren a la superficie de terreno existente durante el proceso de barrenado.

2.1.6 Hidrogeología del Área General del Proyecto

El USGS y el DRNA han estudiado la hidrogeología del norte de Puerto Rico. De acuerdo a sus estudios, el sistema de acuífero del norte de Puerto Rico consiste de tres unidades hidrogeológicas regionales: el acuífero superior no confinado, la unidad intermedia confinante y el acuífero inferior confinado.

El acuífero superior no confinado incluye a las formaciones Caliza Aymamón, la Caliza Aguada y, en algunas áreas, las capas superiores del Miembro Superior de la Formación Cibao. La Caliza Aymamón es la unidad más permeable del acuífero. El acuífero contiene una zona vadosa relativamente gruesa.

La unidad intermedia confinante incluye al Miembro Superior de la Formación Cibao y los miembros Quebrada Arenas y Caliza Río Indio de la Formación Cibao. La unidad intermedia confinante está compuesta de rocas de permeabilidad baja que confinan al acuífero inferior confinado y no permiten el intercambio de agua subterránea entre los acuíferos superior e inferior.

Por su parte, el acuífero inferior confinado consiste de la Caliza Lares (la cual subyace a la Formación Cibao) y el miembro Caliza Montebello de la Formación Cibao. El acuífero inferior está confinado, excepto en aquellas áreas donde las rocas afloran.

Tanto el acuífero superior como el acuífero inferior se recargan en las áreas donde las formaciones que las componen afloran en la superficie.

Tomando en cuenta las condiciones geológicas a lo largo de la ruta del proyecto propuesto, el proyecto se encuentra dentro de la unidad hidrogeológica del acuífero superior no confinado.

En la publicación “Open-File Report 93-499”, el USGS incluye las elevaciones aproximadas del nivel freático (nivel potenciométrico) perteneciente al acuífero superior no confinado. Las elevaciones están dadas en pie con respecto al nivel del mar. Estas elevaciones coinciden con las elevaciones del nivel freático incluidas en la Figura 8 del informe geológico de GeoCim, copia de la cual se muestra en la Figura 24. Utilizando esta información se estimó la posición del nivel freático para las secciones mostradas en las Figuras 15 a 19. De acuerdo

a esta información, el nivel freático se encuentra a varias decenas de metros debajo de la superficie del terreno. Consecuentemente, la zona vadosa a lo largo del proyecto es también de varias decenas de metros de espesor.

La permeabilidad de una formación rocosa es una forma de medir la capacidad de la formación de permitir el flujo de agua. La permeabilidad de una formación rocosa es comúnmente expresada a través del coeficiente de permeabilidad (K) (conductividad hidráulica). La permeabilidad primaria de una formación de caliza está determinada por la permeabilidad de la matriz de la roca. La permeabilidad secundaria de una formación de caliza la definen los canales de disolución y cavidades presentes dentro de la caliza. La permeabilidad secundaria de una caliza puede llegar a ser más de 10^4 mayor que la permeabilidad primaria. Por lo tanto, el flujo de agua interno dentro de las calizas está controlado por los canales de disolución y cavidades presentes dentro de la caliza.

Tal como se mencionó en la Sección 2.1.5, los suelos arcillosos de los Depósitos de Manto tienen una permeabilidad muy baja, por lo que el flujo de agua vertical a través de estos suelos debe ser insignificante. Tomando en cuenta esta condición, la presencia de nódulos y suelo orgánico dentro de los Depósitos de Manto y la edad de estos depósitos, la recarga del acuífero superior no confinado a lo largo de la ruta del proyecto ocurre en aquellas áreas donde las zonas permeables de las calizas afloran. La recarga a través de los Depósitos de Manto a lo largo del proyecto, incluyendo las áreas con sumideros de colapso naturales, debe ser mínima. Por lo tanto, la construcción de porciones del proyecto sobre áreas subyacidas por Depósitos de Manto o sobre sumideros de colapso no debe tener efecto en la recarga del acuífero superior no confinado.

Debido a la ausencia de un sistema integrado de drenaje superficial, será necesario disponer las escorrentías del proyecto a través de charcas de retención y pozos de inyección. Las Figuras 25 y 26 muestran esquemáticamente una forma de preparar las charcas de retención y una sección esquemática de un pozo de inyección. Toda charca de retención deberá impermeabilizarse para evitar cambiar el patrón de drenaje del sector donde se excave la charca. Los pozos de inyección deberán descargar en zonas permeables dentro de la caliza subyacente. Se deberá realizar un estudio detallado de las áreas destinadas para la disposición de escorrentías para poder establecer el diseño de la charca de retención y de los pozos de inyección requeridos. El sistema de drenaje del proyecto deberá incorporar los dispositivos necesarios para atrapar basura, aceite, hidrocarburos o cualquier sólido en suspensión antes de que los mismos lleguen a las charcas de retención. Es importante mantener la calidad del agua que vaya a disponerse para evitar la contaminación del agua subterránea.

2.1.7 Cortes

La construcción del Corredor propuesto requerirá que se lleven a cabo cortes en mogotes localizados a lo largo de la ruta propuesta (ver Figuras 5 a 14). Gran parte de los cortes podrán llevarse a cabo usando equipo normal para movimiento de tierra, tales como “bulldozers” y excavadoras. Es posible que en algunos sectores se requiera utilizar escarificadores (“rippers”) para facilitar los cortes. En los cortes a realizarse en el área de la Cordillera Jaicoa es posible encontrarse caliza de matriz dura, especialmente en el área comprendida entre las estaciones 412+00 a 440+00 aproximadamente. Cortes realizados en varios

sectores dentro del área de esta cordillera han sido realizados con excavadoras provistas de taladros mecánicos de diferentes tamaños. El proceso de cortar con taladro es generalmente lento.

Al presente no es posible definir si será necesario utilizar explosivos (voladuras) en algunos sectores del proyecto para realizar los cortes en la roca caliza. De requerirse el uso de explosivos en algunos sectores locales debido a la dureza de la matriz de la caliza presente entre las estaciones 412+00 a 440+00, las voladuras tendrán que llevarse a cabo bajo un estricto control debido a la posible presencia de cavidades y estructuras en las áreas circunvecinas. Para reducir el efecto de los explosivos en las áreas aledañas, posiblemente se requerirá usar el método de precorte ("presplitting") combinado con el uso de un volumen bajo de explosivos. Este proceso de voladuras es lento ya que el volumen de material a removerse es menor que cuando se usa cantidades mayores de explosivos. El diseño específico del método de voladuras podrá determinarse cuando se lleve a cabo el estudio geotécnico y geológico detallado para el diseño del proyecto. Al presente no se ha detectado en este tramo áreas con problemas de inestabilidad de taludes. Sin embargo, de encontrarse áreas con estabilidad marginal durante el estudio geotécnico y geológico detallado, el uso de explosivos tendrá que limitarse a sectores relativamente alejados de estas áreas para evitar el efecto de las vibraciones en la estabilidad marginal de las mismas. Las vibraciones de los explosivos no representan un peligro para las fallas geológicas mencionadas en la Sección 2.1.2, ya que la cantidad de energía impartida por los explosivos es insignificante cuando se compara con la energía que se requeriría para activar estas fallas geológicas.

El ángulo de inclinación a darse a los cortes del proyecto dependerá de las características físicas del material a cortarse. Es usual llevar a cabo los cortes en caliza con ángulos de inclinación empinados, tomando en cuenta la inclinación natural de las laderas de los mogotes existentes ya que la inclinación natural es un indicio de la inclinación máxima que las laderas pueden alcanzar a largo plazo. Sin embargo, la inclinación final de los cortes podrá establecerse solamente durante la construcción del proyecto ya que dependerá de la presencia y naturaleza de rasgos geológicos que sean expuestos durante la construcción.

2.1.8 Pozos Sépticos

En su Resolución Interlocutoria sobre el proyecto, la Junta de Calidad Ambiental (JCA) solicitó pruebas de percolación y localización del nivel freático en las áreas propuestas para la disposición de las aguas usadas a ser generadas en las estaciones de peaje. Las pruebas de percolación son pruebas de campo que proporcionan (a la inversa) un estimado de la permeabilidad del terreno a profundidades llanas de aproximadamente uno a dos pies. Con el propósito de obtener la permeabilidad del terreno en el rango de profundidades común para pozos sépticos, se decidió realizar pruebas de permeabilidad de laboratorio en muestras inalteradas tomadas a varias profundidades en diferentes sectores a lo largo de la ruta del Corredor. Los resultados de las pruebas de permeabilidad están incluidos en la Sección 2.1.5.

Puesto que las estaciones de peaje han sido localizadas preliminarmente dentro de tramos largos de la ruta del proyecto, el procedimiento anterior permitió

obtener más información sobre la permeabilidad de los Depósitos de Manto, los cuales son los suelos más abundantes a lo largo de la ruta del proyecto.

Tal como se mencionó en la Sección 2.1.5, la permeabilidad es una propiedad de los suelos que indica la facilidad con que el agua puede fluir a través del terreno. Los resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad indican que los Depósitos de Manto presentes a lo largo de la ruta del Corredor propuesto tienen una permeabilidad muy baja (coeficiente de permeabilidad (K) menor de $3x10^{-6}$ cm/seg). Por tal motivo, los sanitarios a ser instalados en las estructuras de peaje del proyecto no podrán utilizar pozos sépticos que descarguen en el terreno ya que el suelo arcilloso no permitiría el flujo de las aguas residuales. El mismo problema existe con el uso de trincheras de drenaje. Por lo tanto, será necesario utilizar pozos sépticos de retención que puedan vaciarse periódicamente. La capacidad del pozo séptico de retención tendrá que ser determinada dependiendo de las necesidades de las estaciones de peaje. Los pozos sépticos de retención podrán construirse soterrados (si las reglamentaciones de las agencias correspondientes lo permiten). Las paredes de los pozos soterrados deberán diseñarse para soportar presiones laterales de tierra. En caso de utilizarse tanques prefabricados instalados sobre la superficie del terreno, será necesario determinar la capacidad de sustentación del suelo para verificar que el terreno puede soportar las cargas verticales a ser impartidas por el tanque prefabricado. El uso de pozos sépticos de retención de vaciado periódico tiene la conveniencia adicional de que elimina el potencial de contaminación del agua subterránea. Además, tal como se expresó en la Sección 2.1.6, el nivel freático se encuentra a varias decenas de metros debajo de la superficie del terreno a lo largo de la ruta del proyecto por lo que es poco probable que cualquier derrame de los pozos alcance el nivel freático.

3.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES

A base de lo expuesto anteriormente, se concluye lo siguiente:

1. Las fallas geológicas presentes en la porción oeste de la ruta del Corredor propuesto deben haber ocurrido durante el Terciario y se consideran inactivas ya que no manifiestan evidencia física contundente de movimiento en las áreas cubiertas por los Depósitos de Manto, los cuales fueron depositados durante el Terciario superior y Cuaternario inferior. Por lo tanto, las fallas geológicas no representan un peligro sísmico para el proyecto. El efecto de la presencia de las fallas geológicas se manifestará en las condiciones de la caliza cercana a las fallas. Las rocas presentes en las vecindades de fallas geológicas se encuentran generalmente altamente fracturadas e intemperizadas, condiciones que tendrán que tomarse en cuenta durante la construcción de los cortes que vayan a realizarse en estos sectores.

2. La ruta del Corredor propuesto atraviesa sectores con coluvión y sectores afectados por deslizamientos. El coluvión más significativo se encuentra acumulado en los desfiladeros de los ríos Camuy y Guajataca. Este coluvión no representa problemas a la construcción del Corredor ya que el cauce de los ríos será atravesado por medio de puentes a ser localizados en la parte superior de los desfiladeros de los ríos. El diseño de la fundación de estos puentes deberá tomar en cuenta la presencia de coluvión en algunos sectores (barreno B-1) y de la posible presencia de las zonas permeables dentro de las calizas. Las fundaciones de los puentes deberán colocarse a una distancia a ser estimada para alejarse suficientemente de las caras de los desfiladeros de los ríos y evitar impartir cargas laterales que puedan causar problemas de estabilidad de las caras.

3. La construcción de puentes será también requerida para el cruce de la Quebrada La Sequía y de los canales de riego que intersecan la ruta del proyecto. Las fundaciones de los puentes deberán apartarse de los canales de riego para evitar alterar las condiciones existentes de las estructuras de los canales.

4. La ruta del Corredor atraviesa un sector identificado con depósitos de deslizamiento cerca de las estaciones 440+00 a 446+00. Debido a que al presente no es posible establecer la magnitud del deslizamiento que pudo haber ocurrido en el área, para el diseño del Corredor tendrá que llevarse a cabo un estudio geotécnico y geológico detallado del área para determinar la magnitud del terreno afectado por el deslizamiento y el tipo de medidas correctivas que haya que construir. El estudio geotécnico/geológico tendrá que incluir la instalación de instrumentación de campo, tales como la instalación de varios inclinómetros y piezómetros o pozos de observación. Si el volumen del terreno afectado por el deslizamiento resulta ser de gran magnitud, la solución al problema puede requerir medidas correctivas costosas. Bajo estas circunstancias, es posible que se requiera la relocalización del Corredor en estos sectores para evitar atravesar los depósitos de deslizamiento. En esta etapa de evaluación no es posible determinar qué tipo de medidas correctivas pueden considerarse ya que dependerá de las elevaciones finales de la carretera propuesta y de los resultados del estudio geotécnico/geológico detallado del sector.

5. Para poder usar algunos sumideros de roca para el drenaje de escorrentías del proyecto será necesario preparar los sumideros para su mejor funcionamiento. La Figura 22 muestra esquemáticamente una forma de preparar los sumideros. La capacidad de cada sumidero de roca a utilizarse tendrá que

estimarse por medio de un estudio detallado del mismo. En caso de que la ruta del Corredor interseque un sumidero de roca, será necesario evaluar las condiciones del sumidero y determinar si el mismo puede soportar las cargas a ser impuestas por el proyecto. De considerarse que el sumidero es estable, se podrá proceder a preparar el sumidero con mortero con revenimiento bajo ("small slump") instalado a baja presión para evitar que el mortero viaje demasiado dentro de la zona permeable a la cual pertenece el sumidero de roca. Las escorrentías naturales que originalmente drenaban a través del sumidero de roca preparado tendrán que ser encausadas hacia otros puntos de drenaje para su disposición, tal como se describe en la Sección 2.1.6.

6. Los suelos arcillosos de los Depósitos de Manto tienen una permeabilidad muy baja, por lo que el flujo de agua a través de estos suelos debe ser insignificante. Tomando en cuenta esta condición, la presencia de nódulos y suelo orgánico dentro de los Depósitos de Manto y la edad de estos depósitos, la recarga del acuífero superior no confinado a lo largo de la ruta del proyecto ocurre en aquellas áreas donde las zonas permeables de las calizas afloran. La recarga a través de los Depósitos de Manto a lo largo del proyecto, incluyendo las áreas con sumideros de colapso naturales, debe ser mínima. Por lo tanto, la construcción de porciones del proyecto sobre áreas subyacidas por Depósitos de Manto o sobre sumideros de colapso no debe tener efecto en la recarga del acuífero superior no confinado.

7. Debido a la ausencia de un sistema integrado de drenaje superficial, será necesario disponer las escorrentías del proyecto a través de charcas de retención y pozos de inyección. Las Figuras 25 y 26 muestran esquemáticamente una forma de preparar las charcas de retención y una sección esquemática de un pozo de inyección. Toda charca de retención deberá impermeabilizarse para evitar cambiar el patrón de drenaje del sector donde se

excave la charca. Los pozos de inyección deberán descargar en zonas permeables dentro de la caliza subyacente. Se deberá realizar un estudio detallado de las áreas destinadas para la disposición de escorrentías para poder establecer el diseño de la charca de retención y de los pozos de inyección requeridos. El sistema de drenaje del proyecto deberá tener los dispositivos necesarios para atrapar basura, aceite, hidrocarburos o cualquier sólido en suspensión antes de que los mismos lleguen a las charcas de retención. Es importante mantener la calidad del agua que vaya a disponerse para evitar la contaminación del agua subterránea.

8. La construcción del Corredor propuesto requerirá que se lleven a cabo cortes en mogotes localizados a lo largo de la ruta propuesta (ver Figuras 5 a 14). Gran parte de los cortes podrán llevarse a cabo usando equipo normal para movimiento de tierra, tales como “bulldozers” y excavadoras. Es posible que en algunos sectores se requiera utilizar escarificadores (“rippers”) para facilitar los cortes. En los cortes a realizarse en el área de la Cordillera Jaicoa es posible encontrarse caliza de matriz dura, especialmente en el área comprendida entre las estaciones 412+00 a 440+00 aproximadamente. Cortes realizados en varios sectores dentro del área de esta cordillera han sido realizados con excavadoras provistas de taladros mecánicos de diferentes tamaños. El proceso de cortar con taladro es generalmente lento. Al presente no es posible definir si será necesario utilizar explosivos (voladuras) en algunos sectores del proyecto para realizar los cortes en la roca caliza. De requerirse el uso de explosivos en algunos sectores locales debido a la dureza de la matriz de la caliza presente entre las estaciones 412+00 a 440+00, las voladuras tendrán que llevarse a cabo bajo un estricto control debido a la posible presencia de cavidades y estructuras en las áreas circunvecinas. Para reducir el efecto de los explosivos en las áreas aledañas, posiblemente se requerirá usar el método de precorte (“presplitting”) combinado con el uso de un volumen bajo de explosivos. Este

proceso de voladuras es lento ya que el volumen de material a removerse es menor que cuando se usa cantidades mayores de explosivos. El diseño específico del método de voladuras podrá determinarse cuando se lleve a cabo el estudio geotécnico y geológico detallado para el diseño del proyecto. Al presente no se ha detectado en este tramo áreas con problemas de inestabilidad de taludes. Sin embargo, de encontrarse áreas con estabilidad marginal durante el estudio geotécnico y geológico detallado, el uso de explosivos tendrá que limitarse a sectores relativamente alejados de estas áreas para evitar el efecto de las vibraciones en la estabilidad marginal de las mismas. Las vibraciones de los explosivos no representan un peligro para las fallas geológicas mencionadas en la Sección 2.1.2, ya que la cantidad de energía impartida por los explosivos es insignificante cuando se compara con la energía que se requeriría para activar estas fallas geológicas.

9. Los Depósitos de Manto presentes a lo largo de la ruta del Corredor propuesto tienen una permeabilidad muy baja (coeficiente de permeabilidad (K) menor de $3x10^{-6}$ cm/seg). Por tal motivo, los sanitarios a ser instalados en las estructuras de peaje del proyecto no podrán utilizar pozos sépticos que descarguen en el terreno ya que el suelo arcilloso no permitiría el flujo de las aguas residuales. El mismo problema existe con el uso de trincheras de drenaje. Por lo tanto, será necesario utilizar pozos sépticos de retención que puedan vaciarse periódicamente. La capacidad del pozo séptico de retención tendrá que ser determinada dependiendo de las necesidades de las estaciones de peaje. El uso de pozos sépticos de retención de vaciado periódico tiene la conveniencia adicional de que elimina el potencial de contaminación del agua subterránea. Además, tal como se expresó en la Sección 2.1.6, el nivel freático se encuentra a varias decenas de metros debajo de la superficie del terreno a lo largo de la ruta del proyecto por lo que es poco probable que cualquier derrame de los pozos alcance el nivel freático.

4.1 COMENTARIOS GENERALES

1. Este informe fue preparado para evaluar el proyecto y atender los planteamientos presentados por agencias gubernamentales para la preparación del DIA-PA del proyecto.

2. En caso de que surjan cambios a la alineación propuesta para el Corredor, debemos ser informados para que los cambios sean revisados y las conclusiones del informe modificadas de ser necesario.

3. Los resultados de esta evaluación están basados en datos de campo obtenidos por esta oficina y en datos recopilados por otros. En caso de que surja información de campo adicional, será necesario revisar dicha información y modificar las conclusiones de este informe de requerirse.

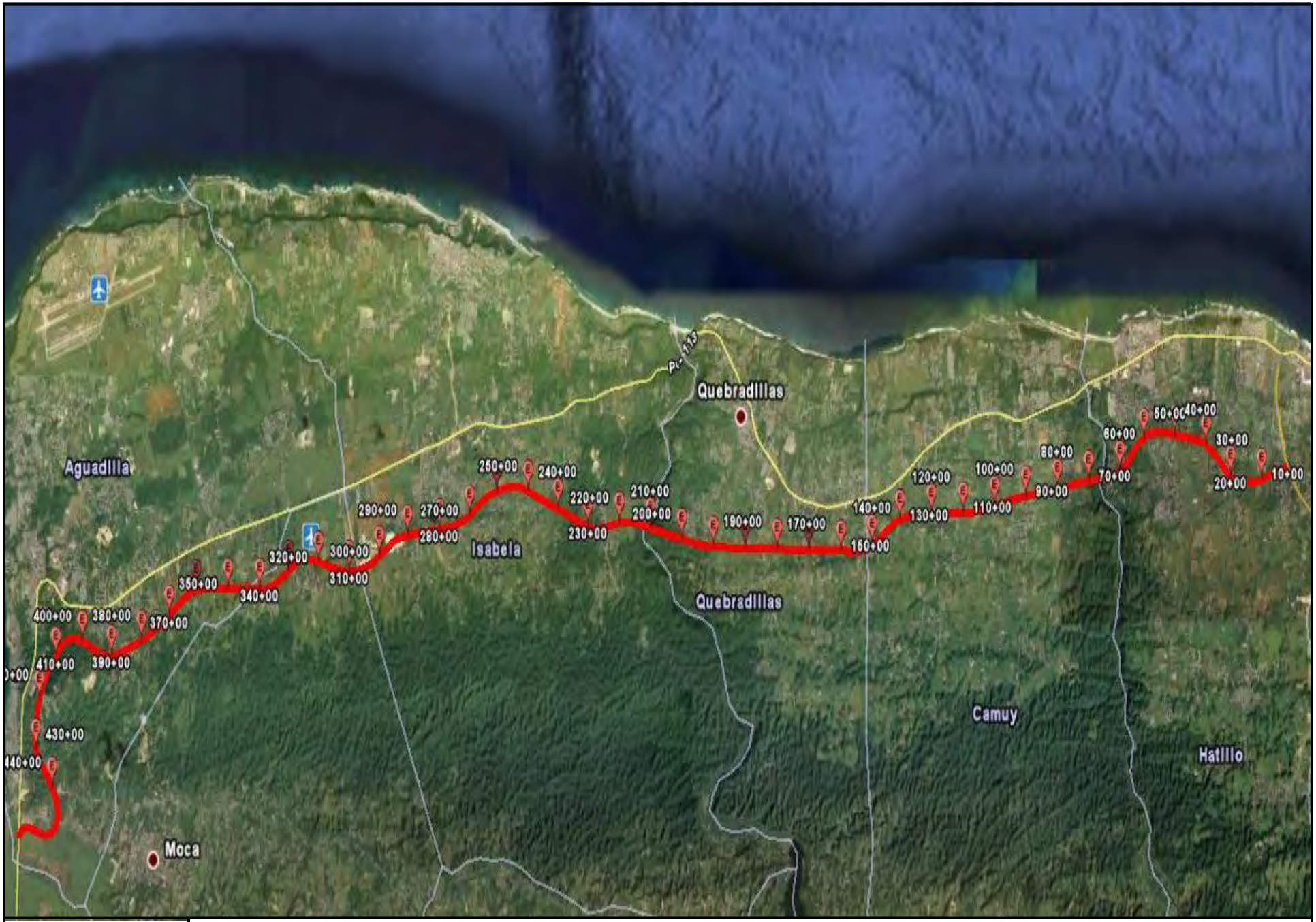
Bajo solemne juramento declaro y certifico que la información vertida en el presente documento es, a mi entender, cierta, correcta y completa. Y para que así conste, firmo y sello el documento.

GEO-Engineering

Carlos E. Rodríguez Pérez, PhD, PE
Ingeniero Geotécnico

18 de agosto de 2010
GEO-731-2010

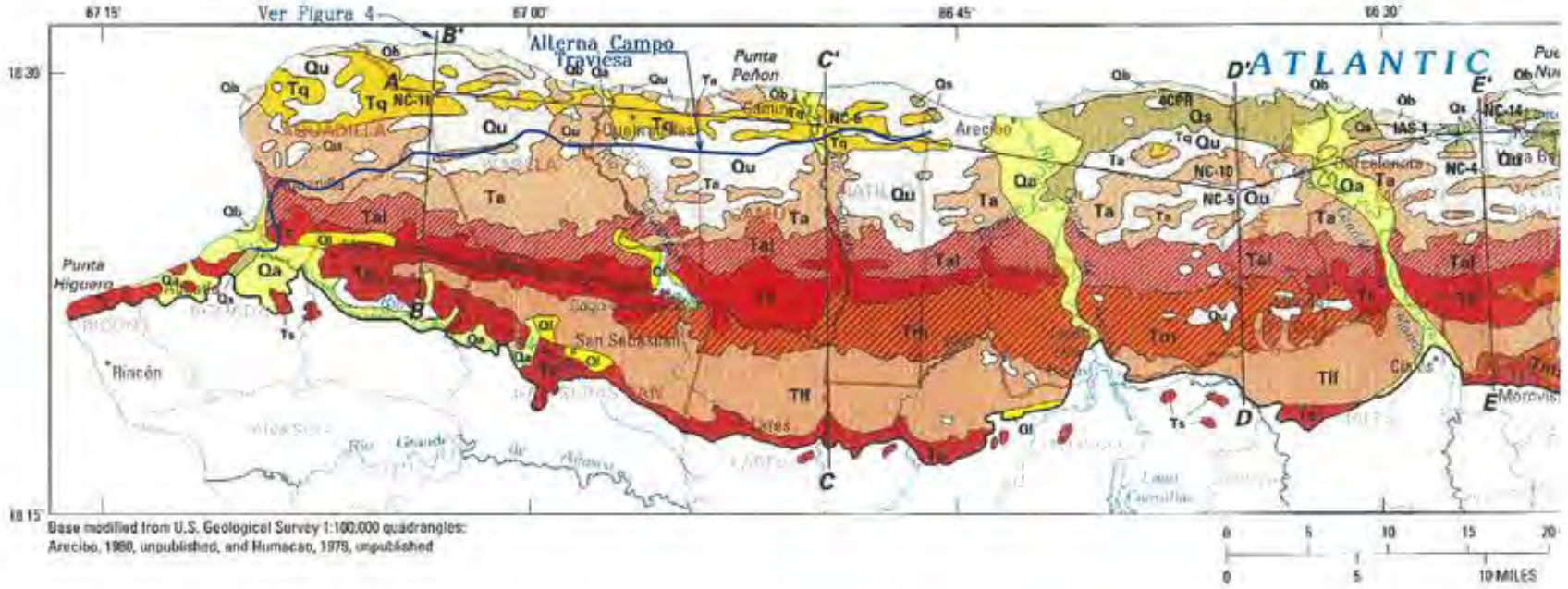
FIGURAS



GEO ENGINEERING

FIGURA 1

Ruta Esquemática del Corredor Hatillo-Aguadilla



EXPLANATION

Quaternary deposits

- Qa — Alluvium
- Ql — Landslide deposits
- Qb — Beach deposits
- Qs — Swamp, marsh deposits
- Qaf — Artificial fill
- Qu — Undifferentiated surficial deposits

Pliocene and Miocene rocks

- Tq — Quebradillas Limestone

Miocene rocks

- Ta — Aymamón Limestone
- Tal — Aguada (Los Puertos) Limestone
- Tc — Cibao Formation
- Tm — Montebello Limestone Member
- Tqa — Quebrada Arenas Limestone Member—Includes Miranda Sand Member
- Ti — Río Indio Limestone Member—Includes Almirante Sur Lentil
- Tg — Guajataca Member

Miocene and Oligocene rocks

- Tmc — Mucarabones Sand
- Tll — Lares Formation
- Ts — San Sebastián Formation

A A' — Line of hydrogeologic section

Southern extent of rocks of Middle Oligocene to Pliocene age

Contact

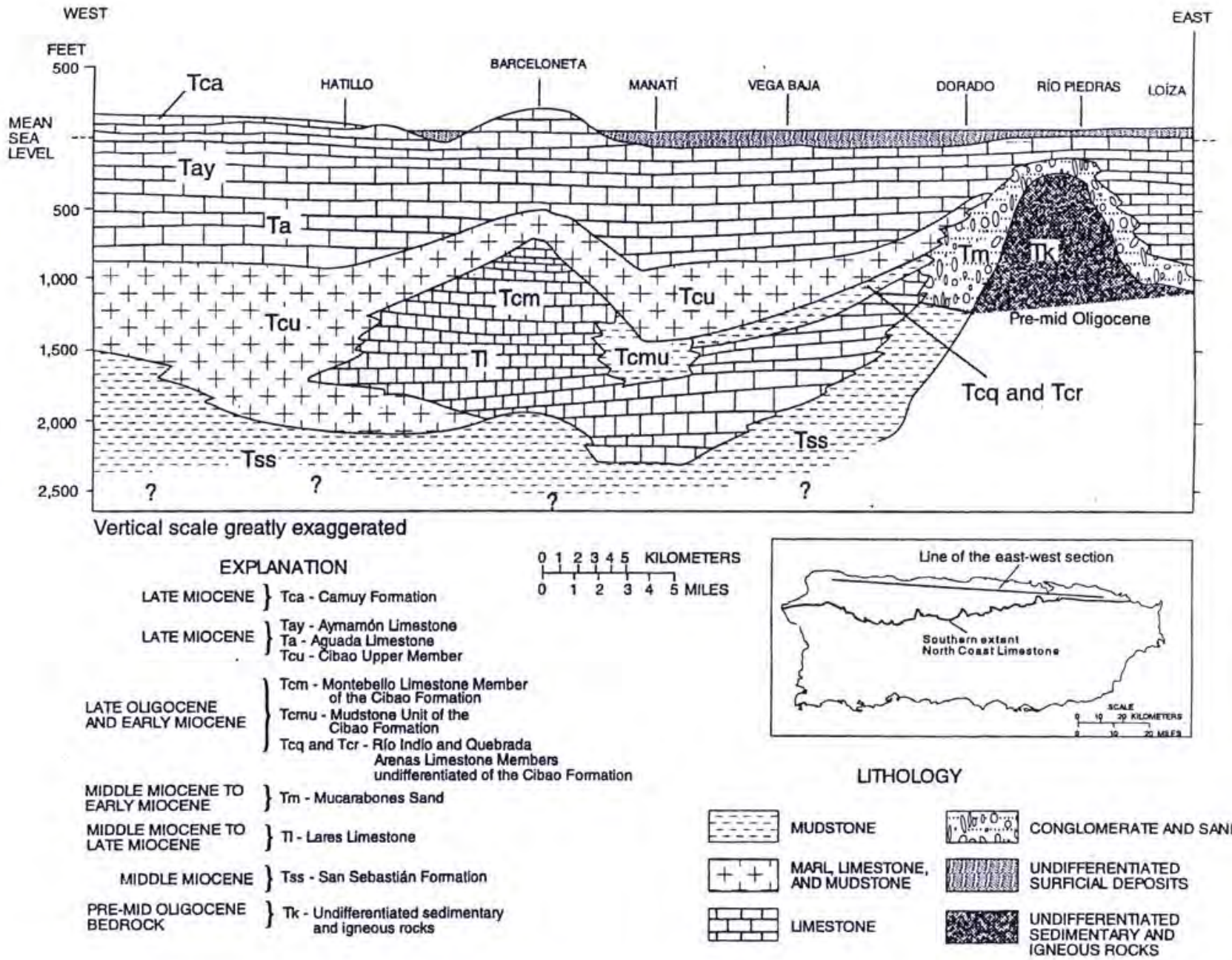
NC-11 — Well control point and number

Fuente: Rentgen y otros, 2002

GEO ENGINEERING

FIGURA 2

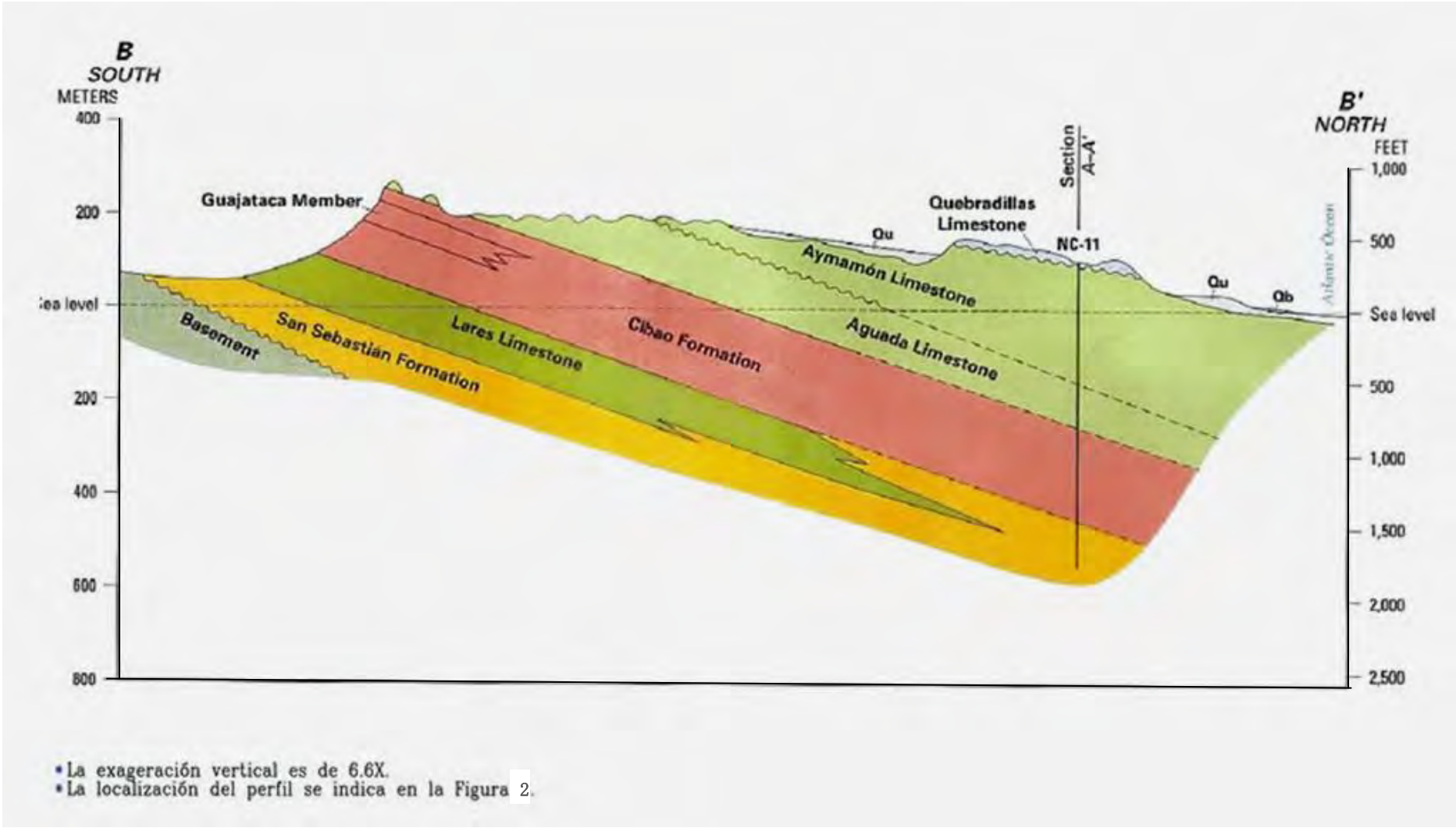
Mapa geológico de la Zona Kárstica



GEO ENGINEERING

FIGURA 3

Sección Geológica Generalizada Este-Oeste a lo largo de la Plataforma Carbonatada del Norte (USGS Report 94-4249)

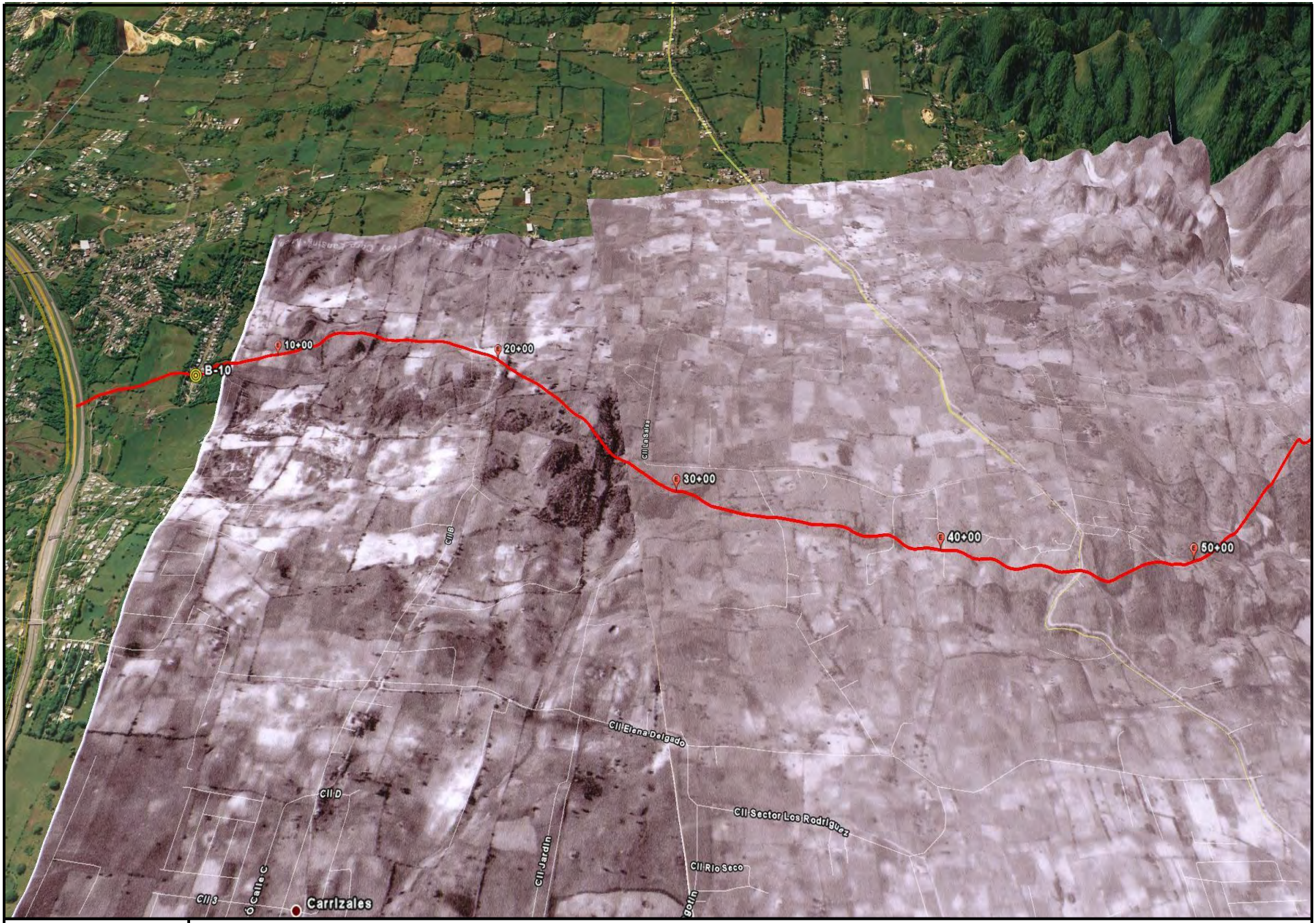


• La exageración vertical es de 6.6X.
• La localización del perfil se indica en la Figura 2.

GEO ENGINEERING

FIGURA 4

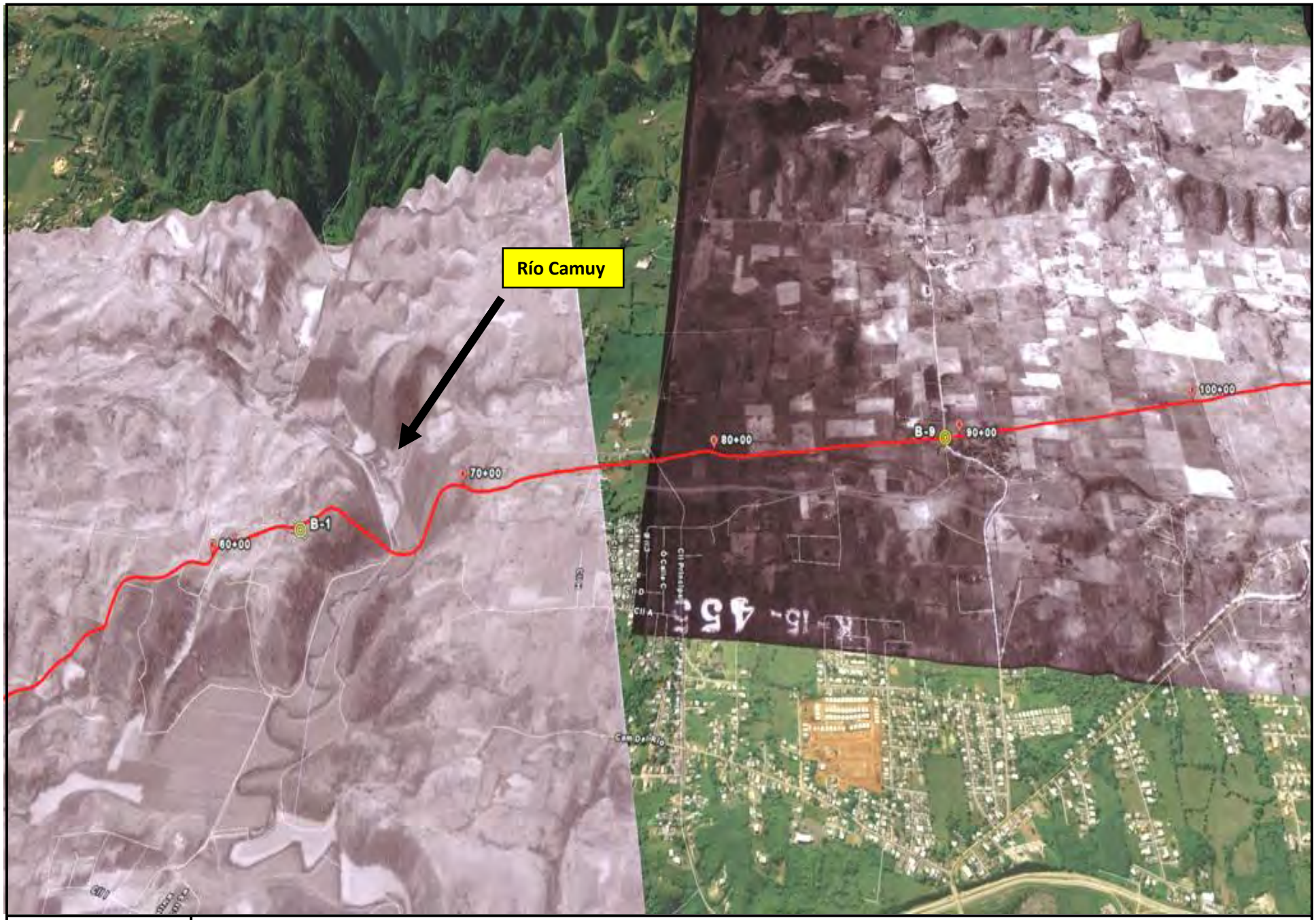
Perfil norte-sur a través de la Zona Kárstica



GEO ENGINEERING

FIGURA 5

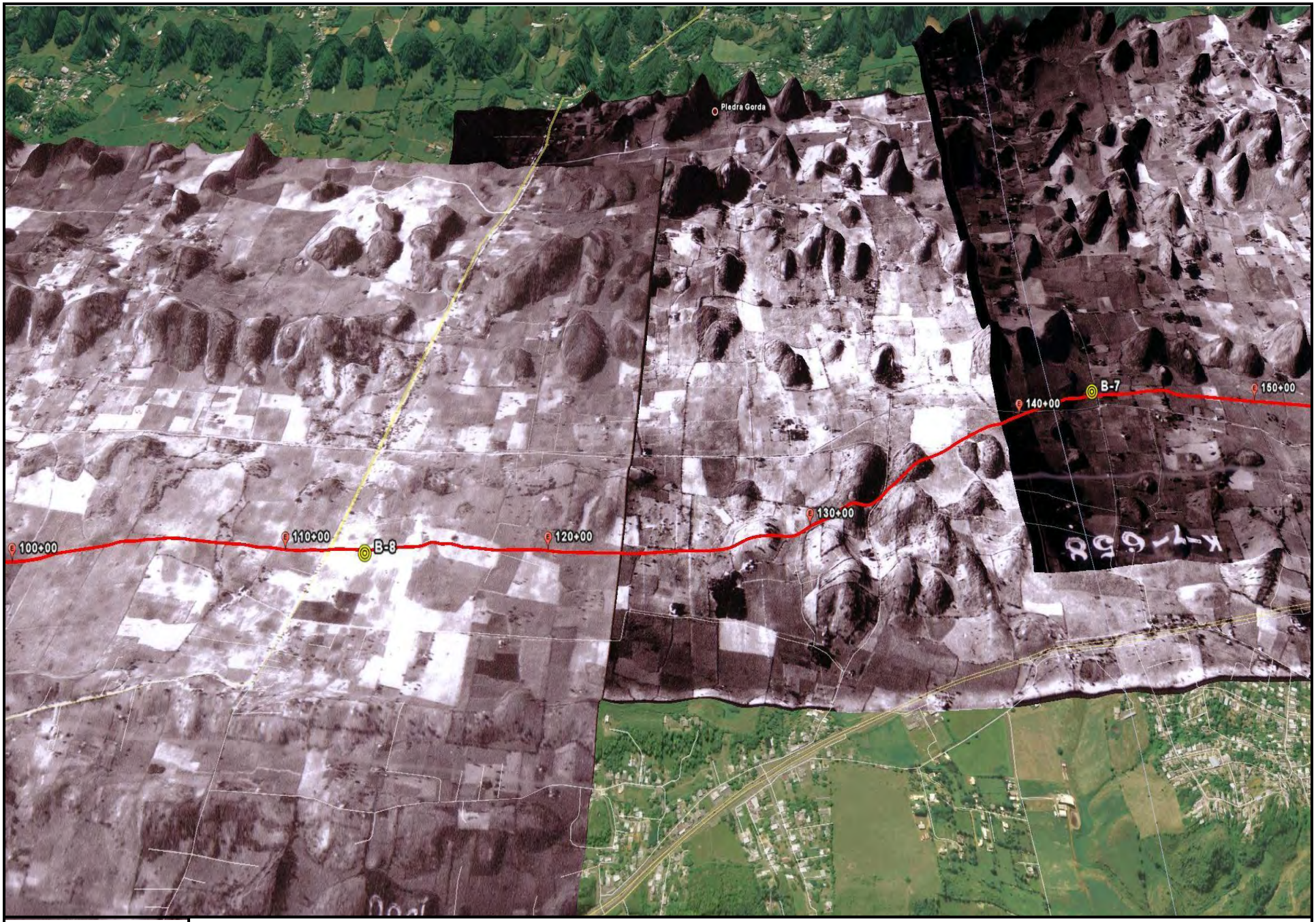
Estación 0+00 a 60+00 (aprox.)



GEO ENGINEERING

FIGURA 6

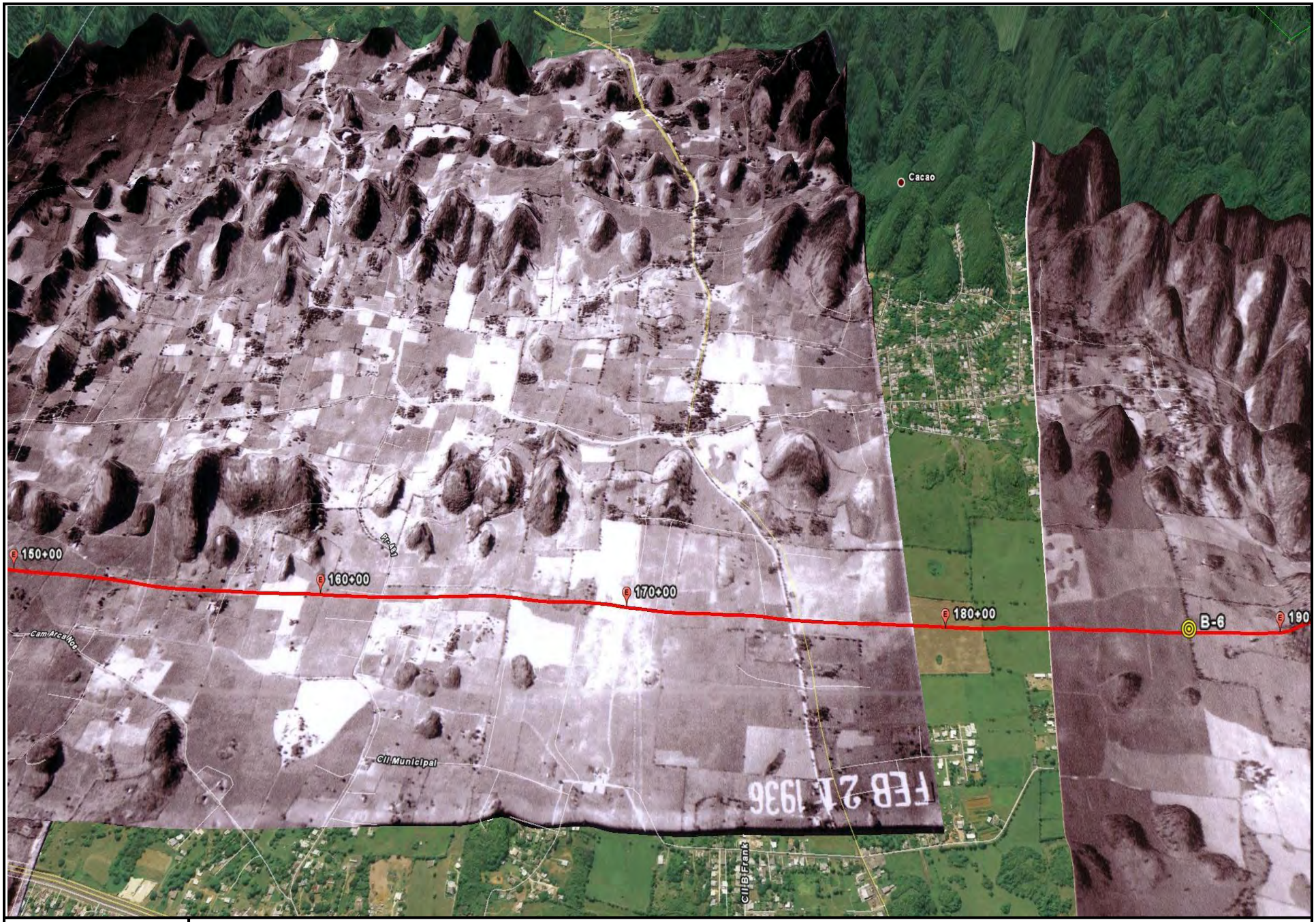
Estación 50+00 a 110+00 (aprox.)



GEO ENGINEERING

FIGURA 7

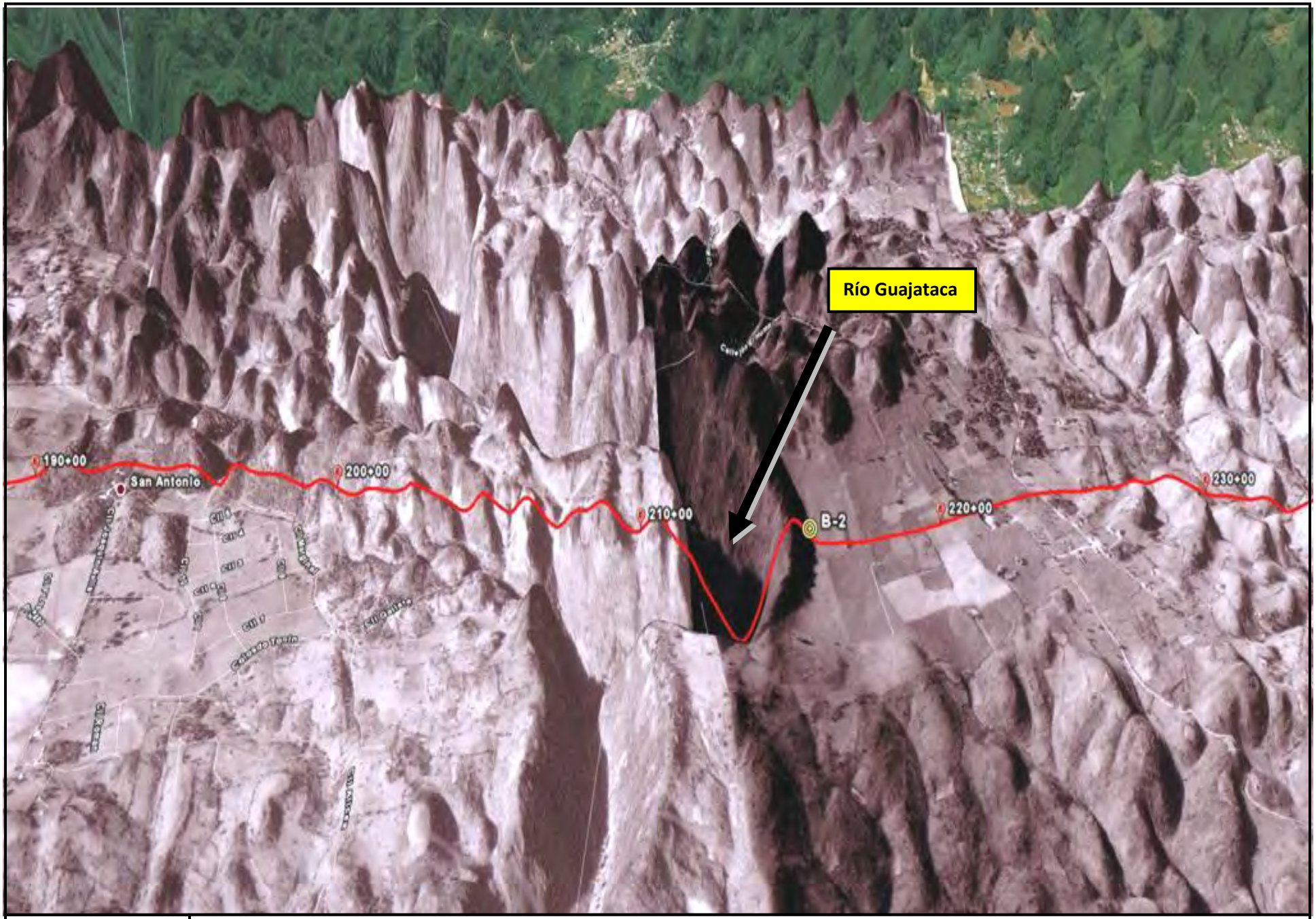
Estación 100+00 a 150+00 (aprox.)



GEO ENGINEERING

FIGURA 8

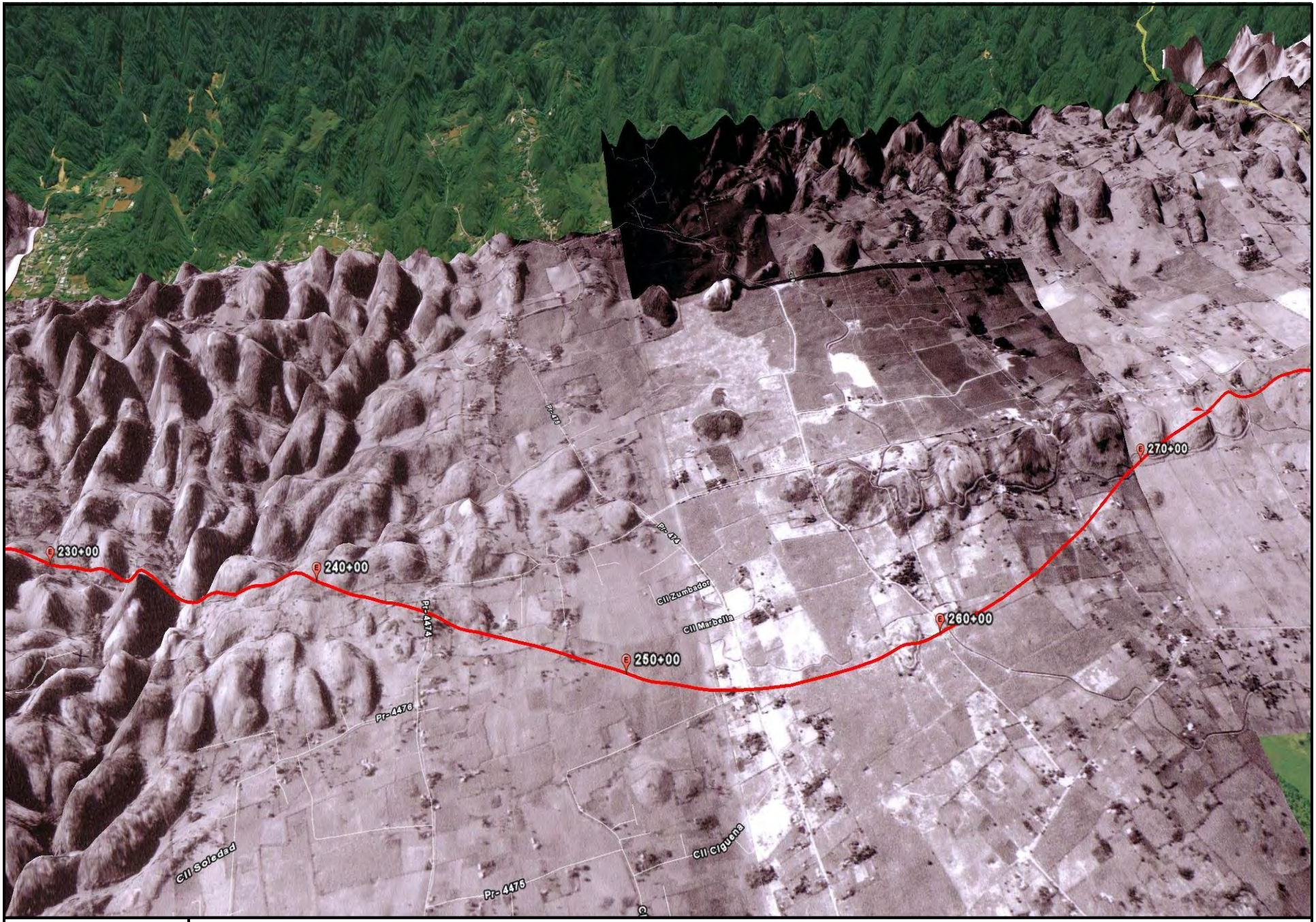
Estación 150+00 a 190+00 (aprox.)



GEO ENGINEERING

FIGURA 9

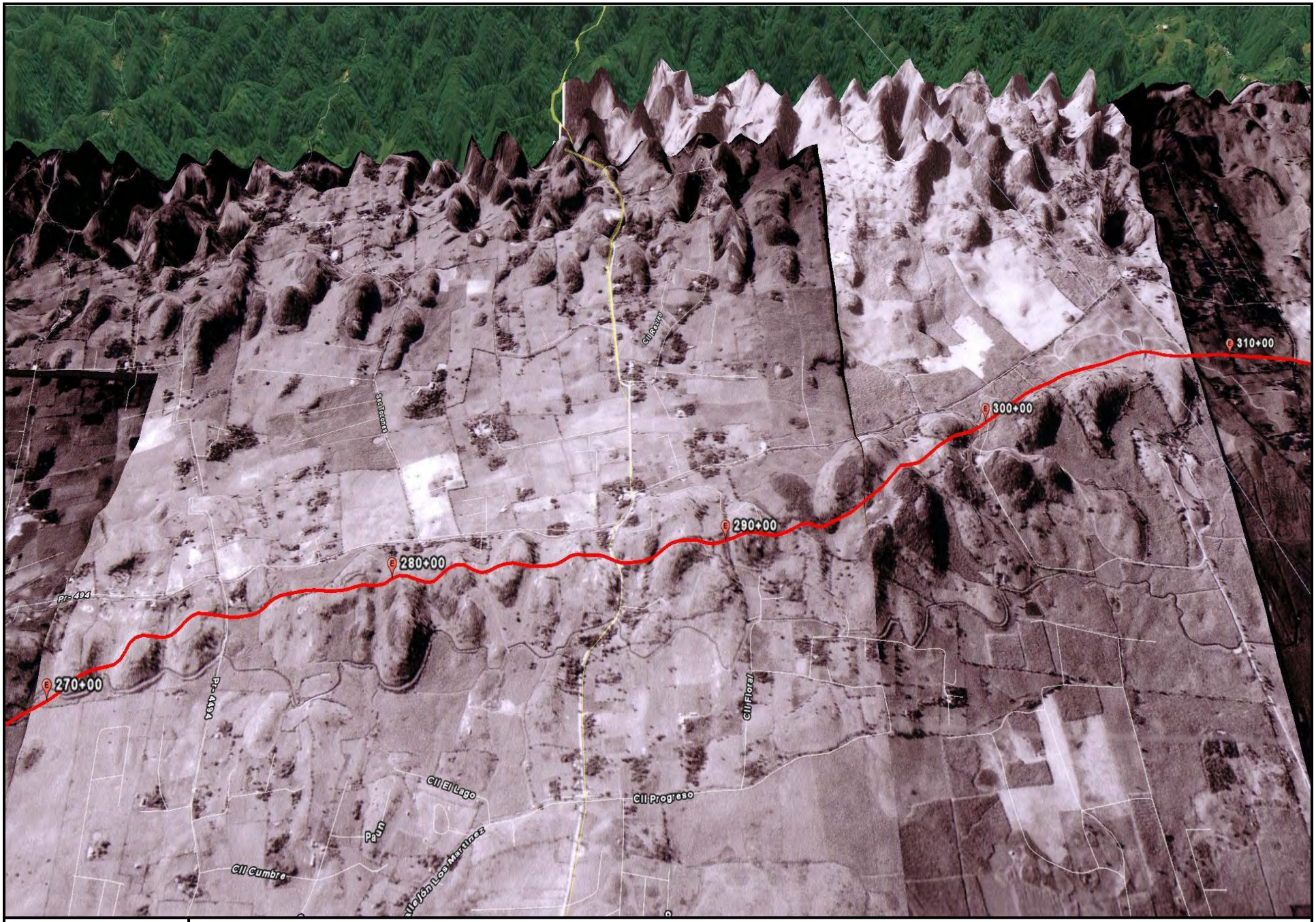
Estación 190+00 a 230+00 (aprox.)



GEO ENGINEERING

FIGURA 10

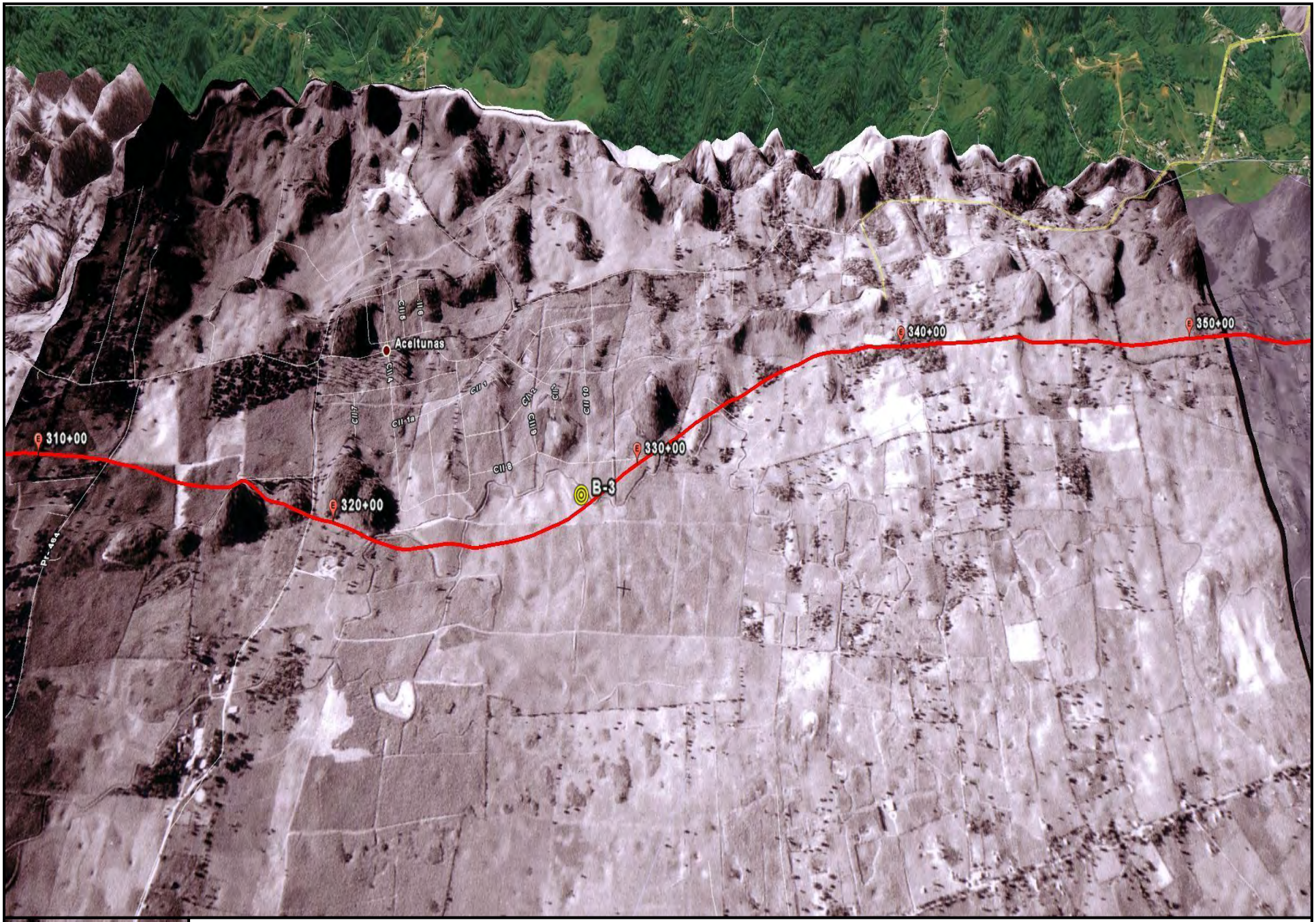
Estación 230+00 a 280+00 (aprox.)



GEO ENGINEERING

FIGURA 11

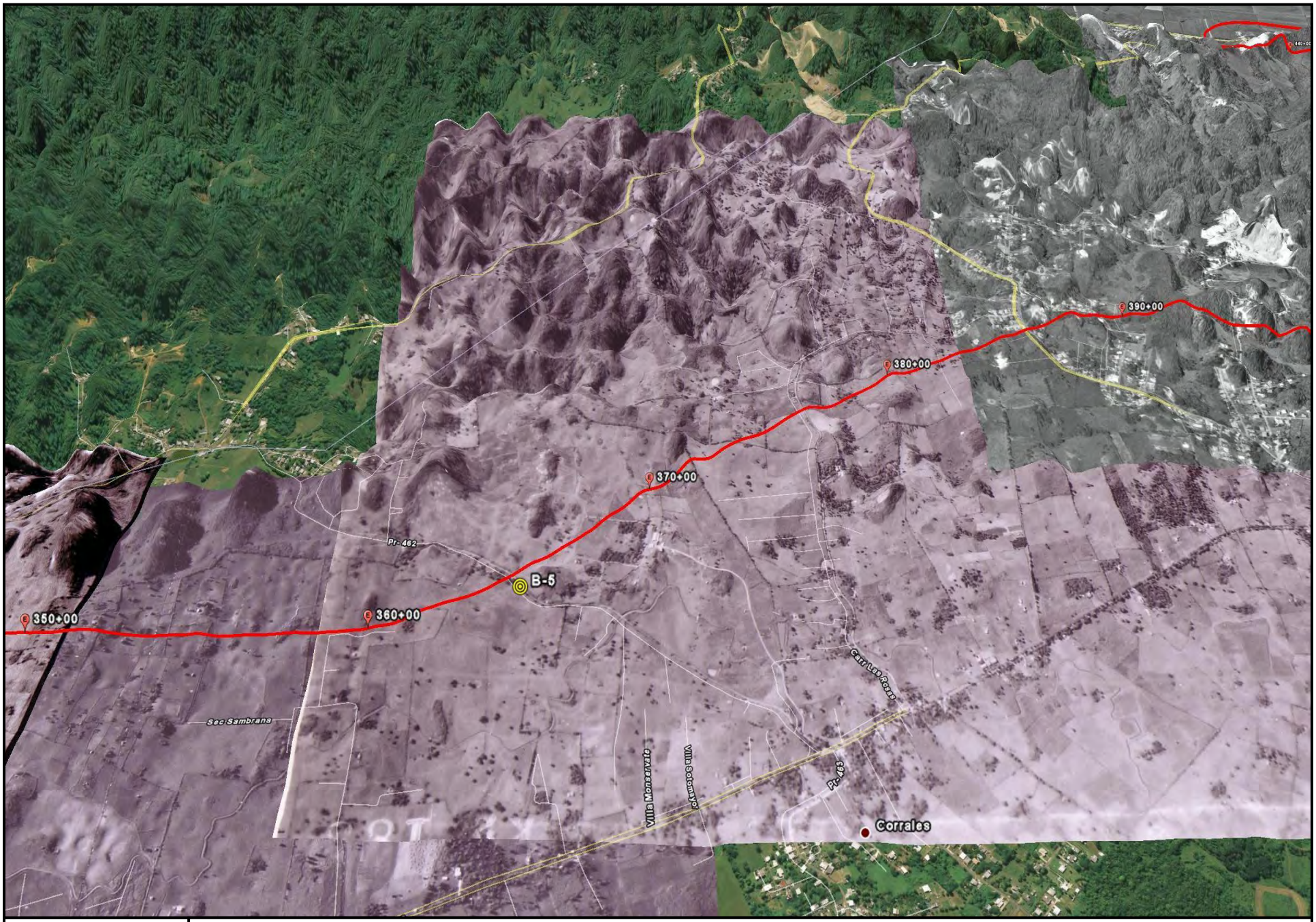
Estación 270+00 a 310+00 (aprox.)



GEO ENGINEERING

FIGURA 12

Estación 310+00 a 350+00 (aprox.)



GEO ENGINEERING

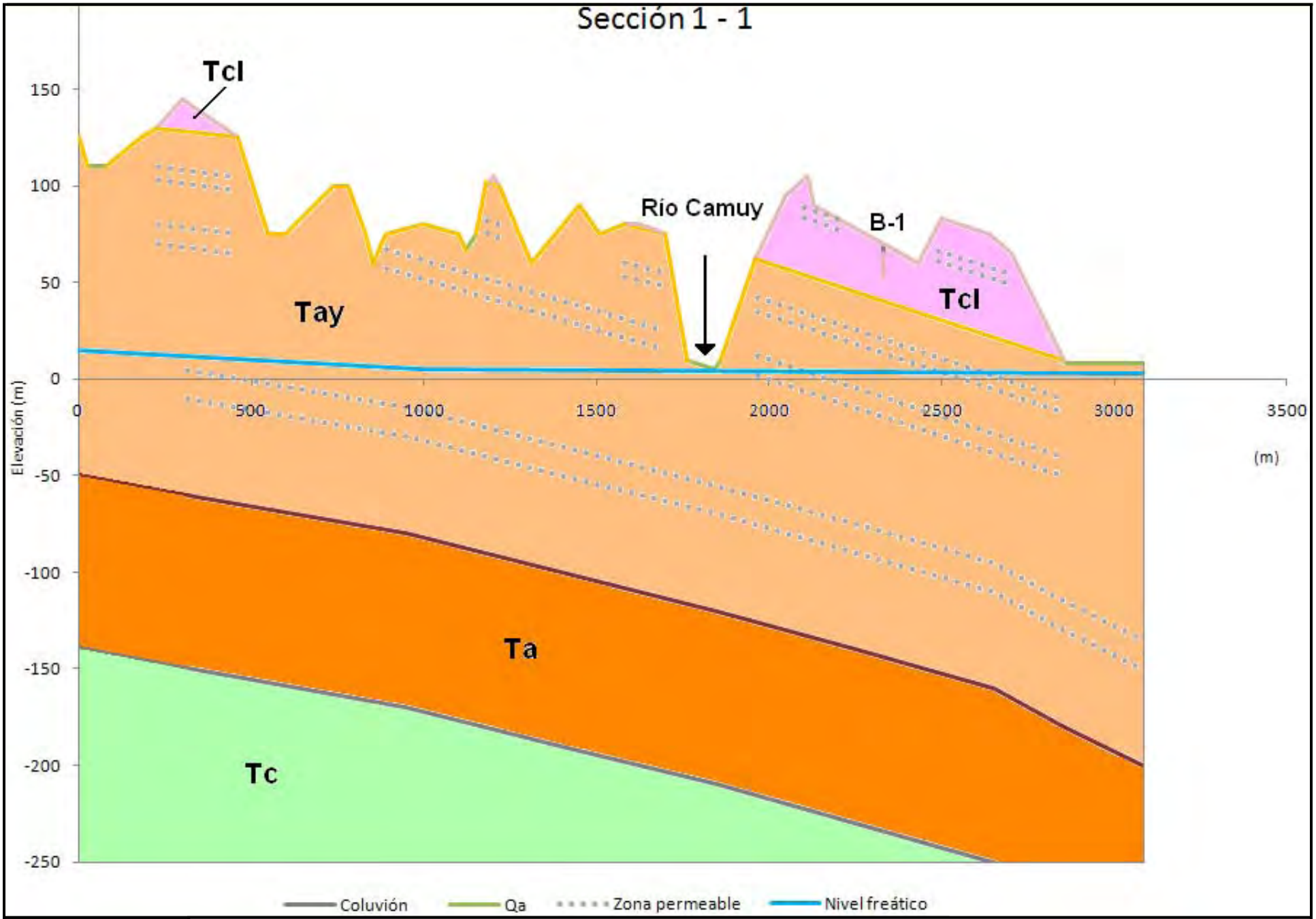
FIGURA 13

Estación 350+00 a 400+00 (aprox.)

GEO ENGINEERING

FIGURA 14

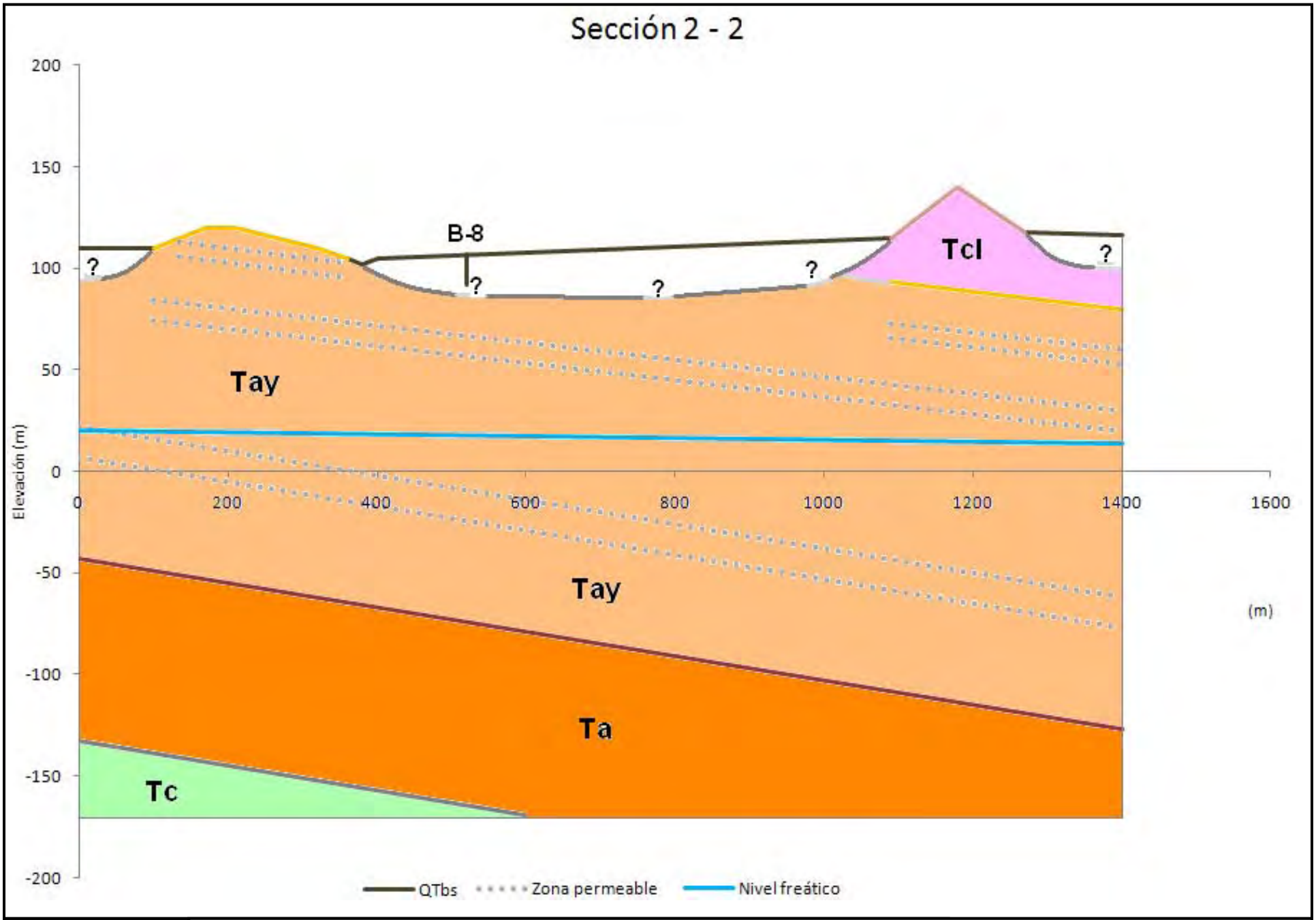
Estación 390+00 a 440+00 (aprox.)



GEO ENGINEERING

FIGURA 15

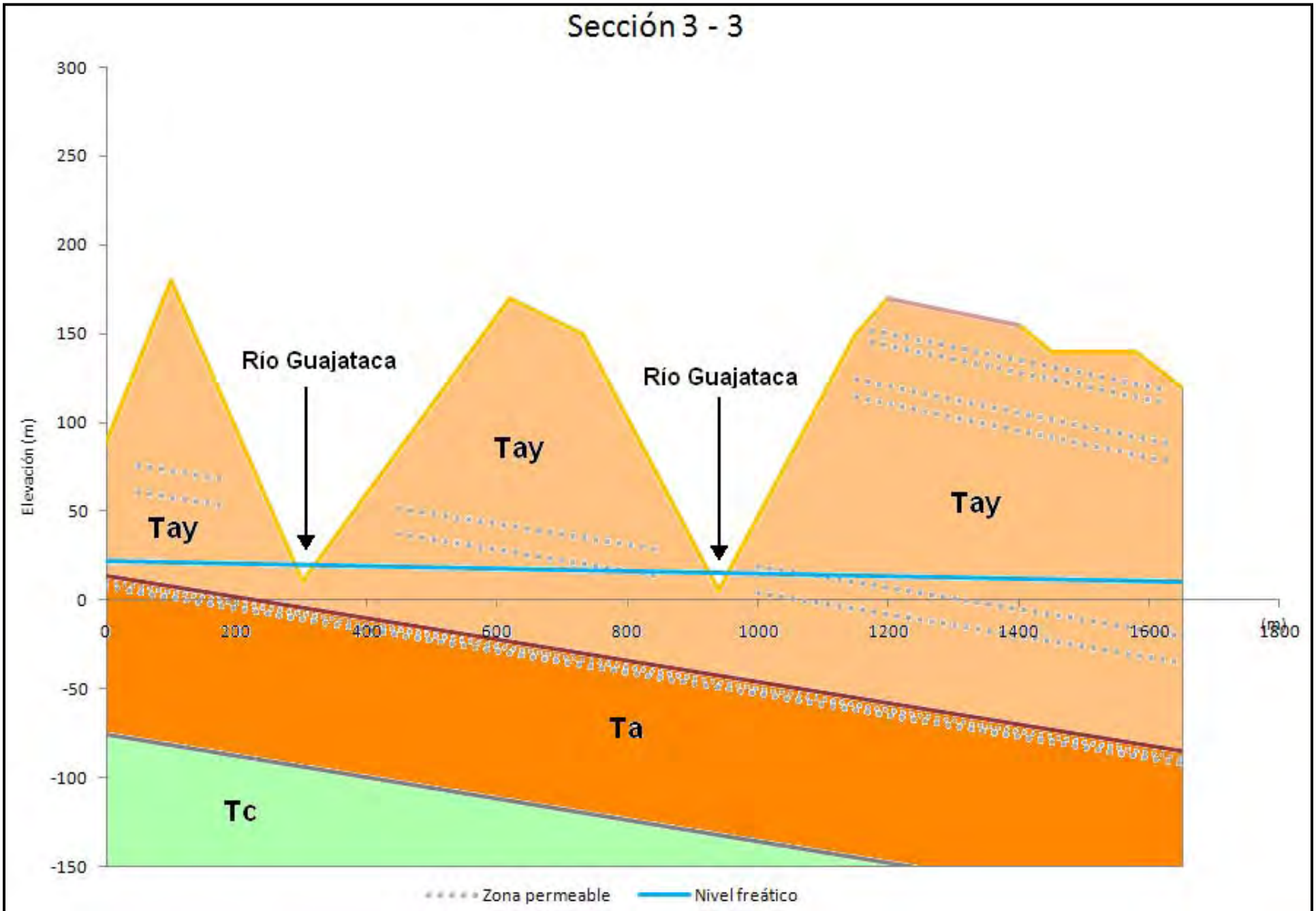
Sección Geológica 1-1



GEO ENGINEERING

FIGURA 16

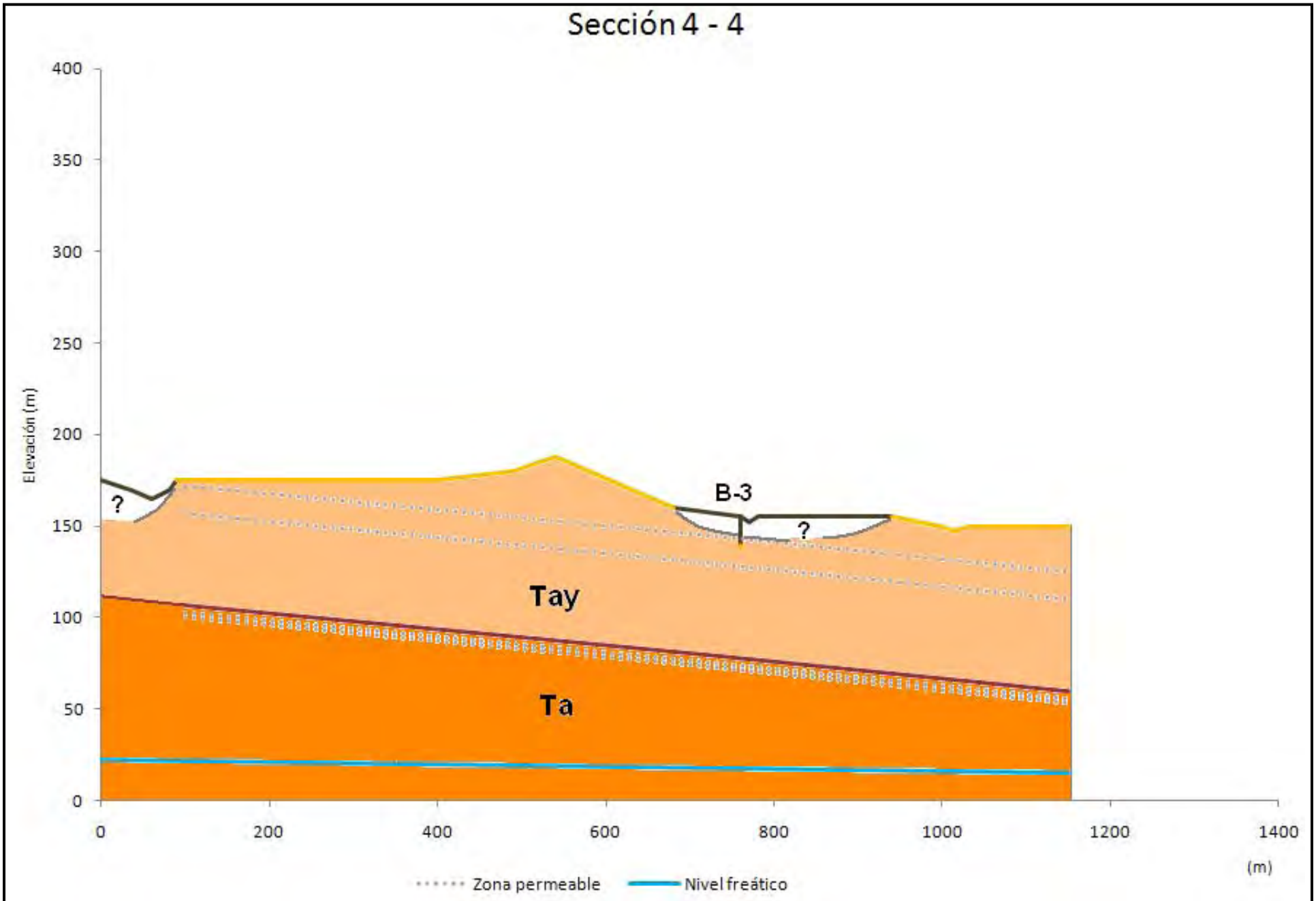
Sección Geológica 2-2



GEO ENGINEERING

FIGURA 17

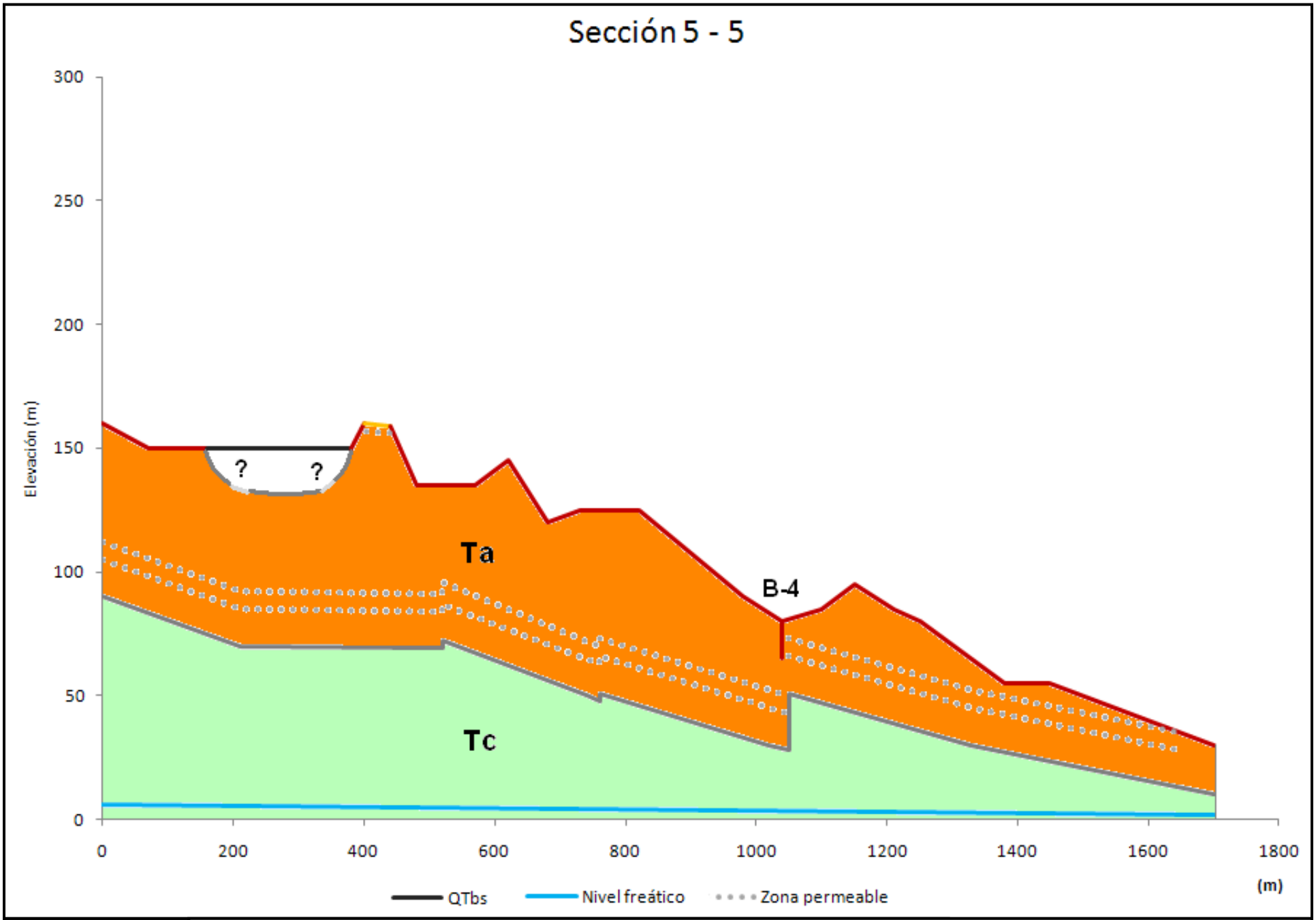
Sección Geológica 3-3



GEO ENGINEERING

FIGURA 18

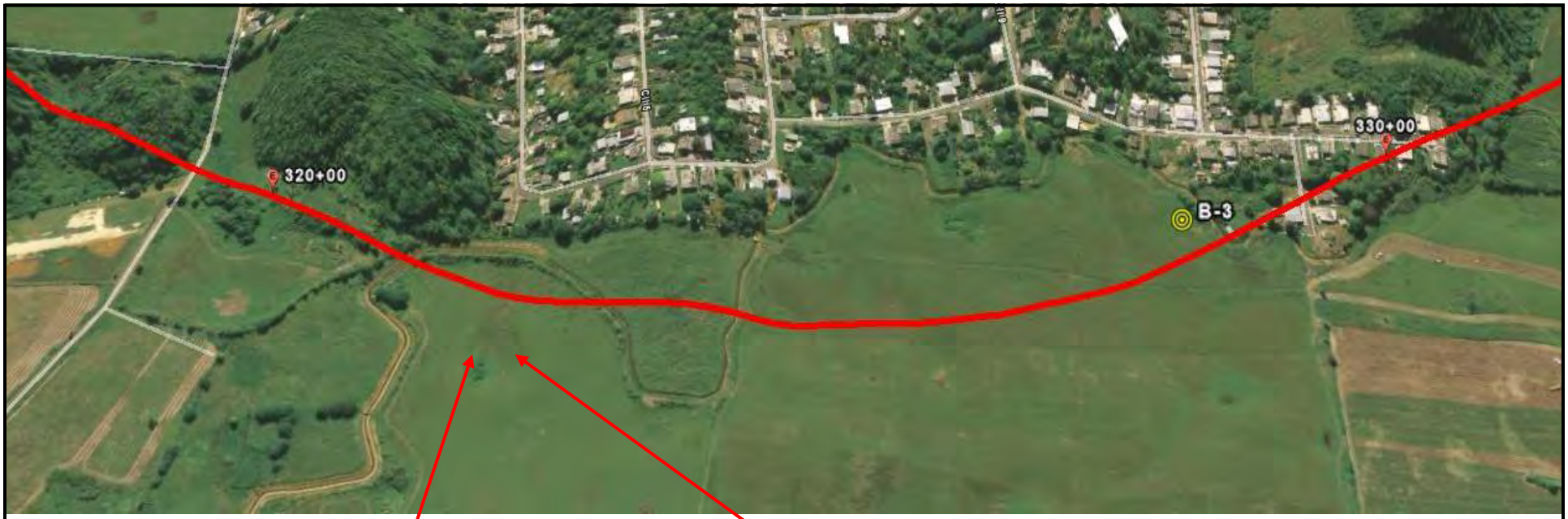
Sección Geológica 4-4



GEO ENGINEERING

FIGURA 19

Sección Geológica 5-5



GEO ENGINEERING

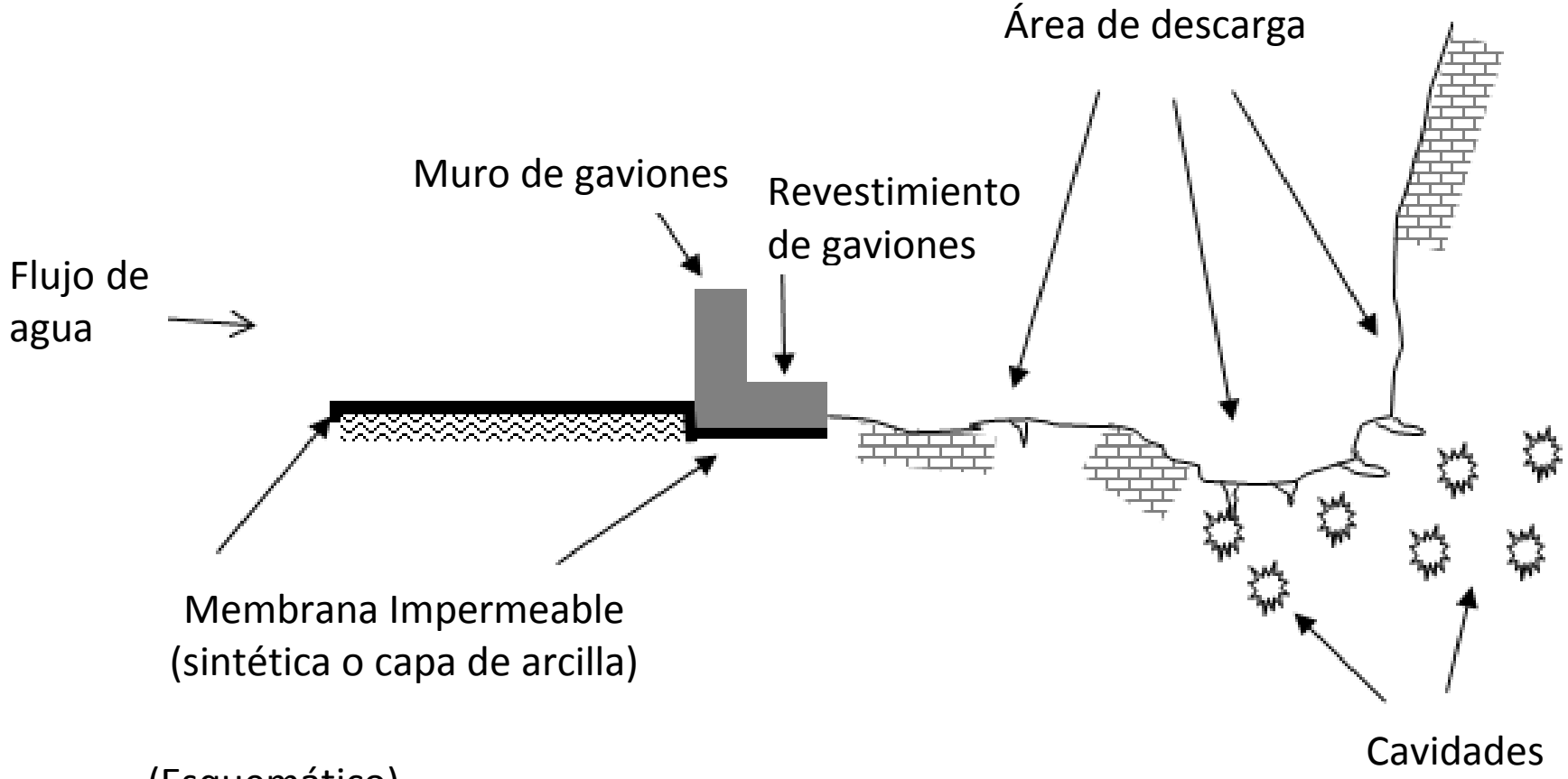
FIGURA 20

Sumidero de Roca (Estación 323+00 aprox.)

GEO ENGINEERING

FIGURA 21

Sumidero de Colapso (Barreno B-3)



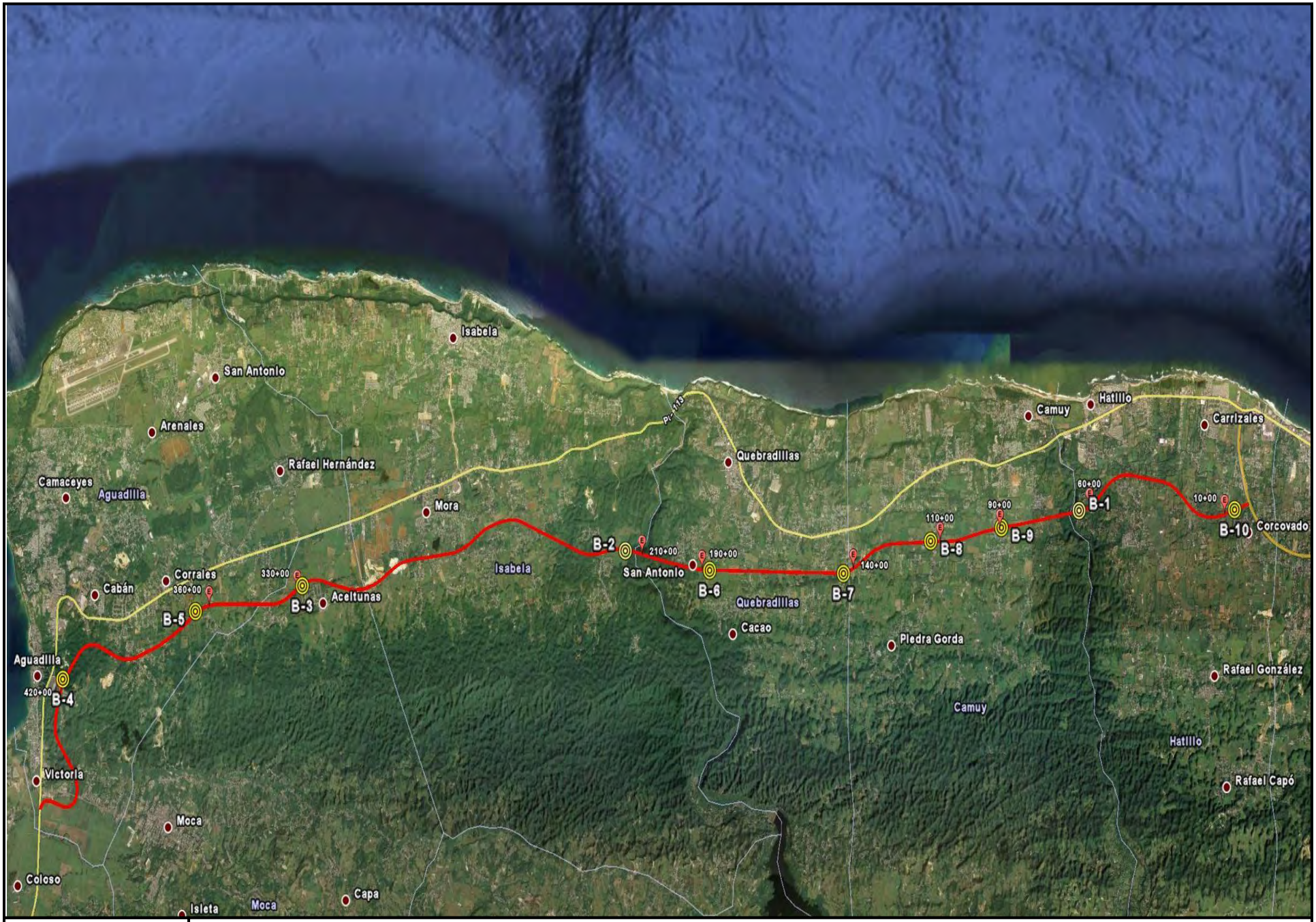
(Esquemático)

Nota: La localización del muro y revestimiento de gaviones tendrá que decidirse en el campo.

GEO ENGINEERING

FIGURA 22

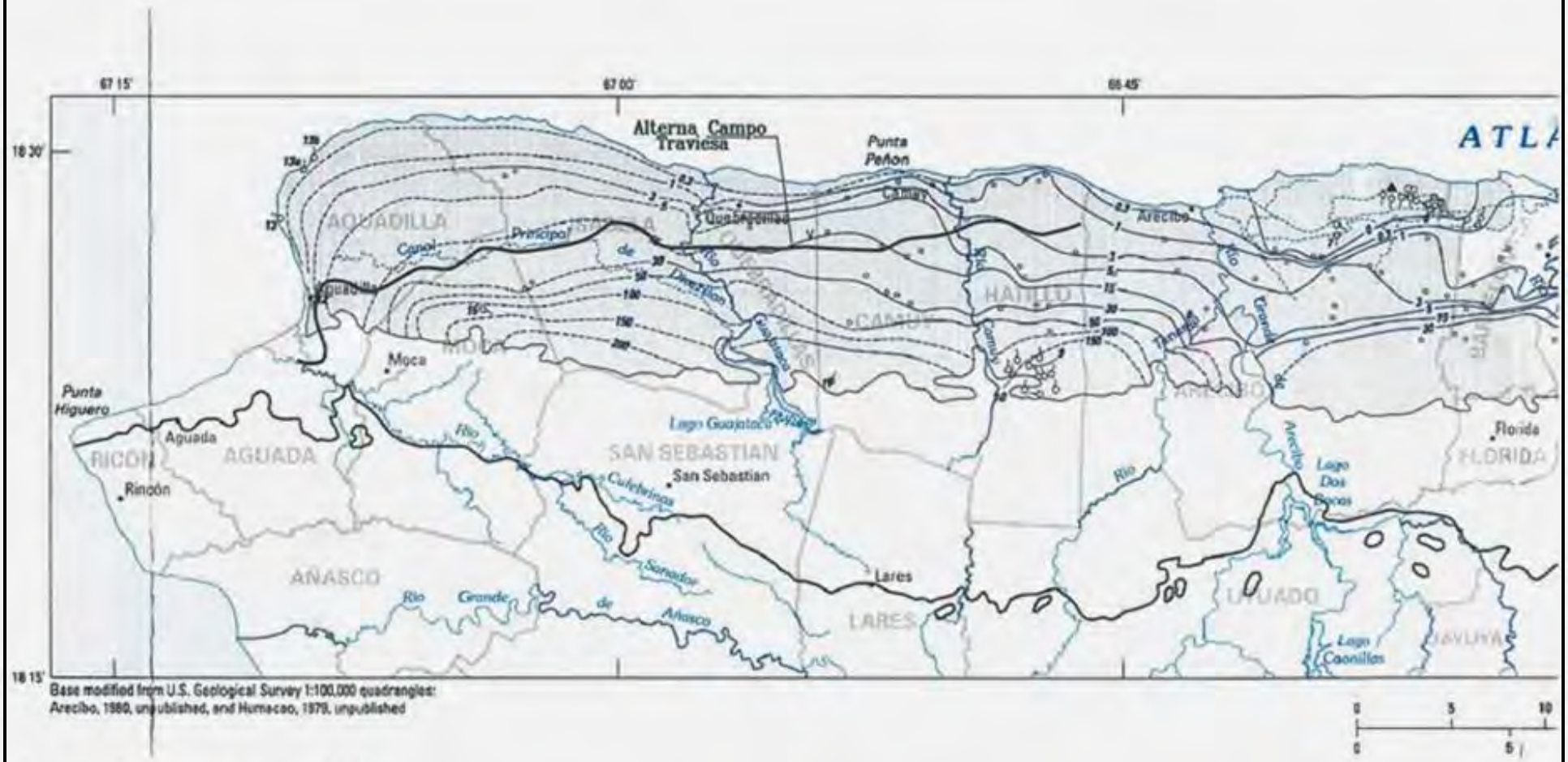
Preparación de Sumideros de Roca



GEO ENGINEERING

FIGURA 23

Ruta Esquemática del Corredor Hatillo- Aguadilla y Localización Aproximada de Barrenos

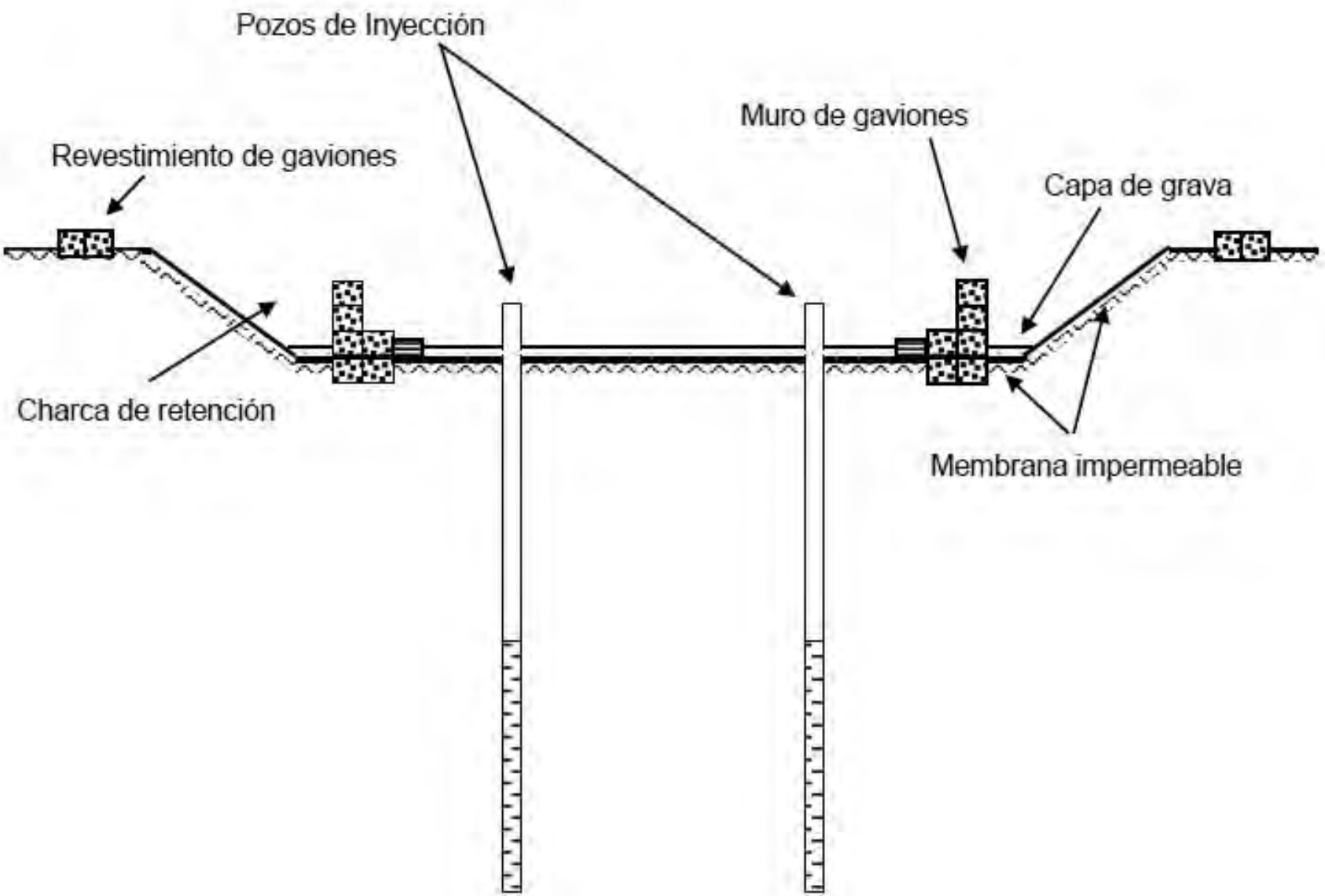


Fuente: Rentgen y otros, 2002

GEO ENGINEERING

FIGURA 24

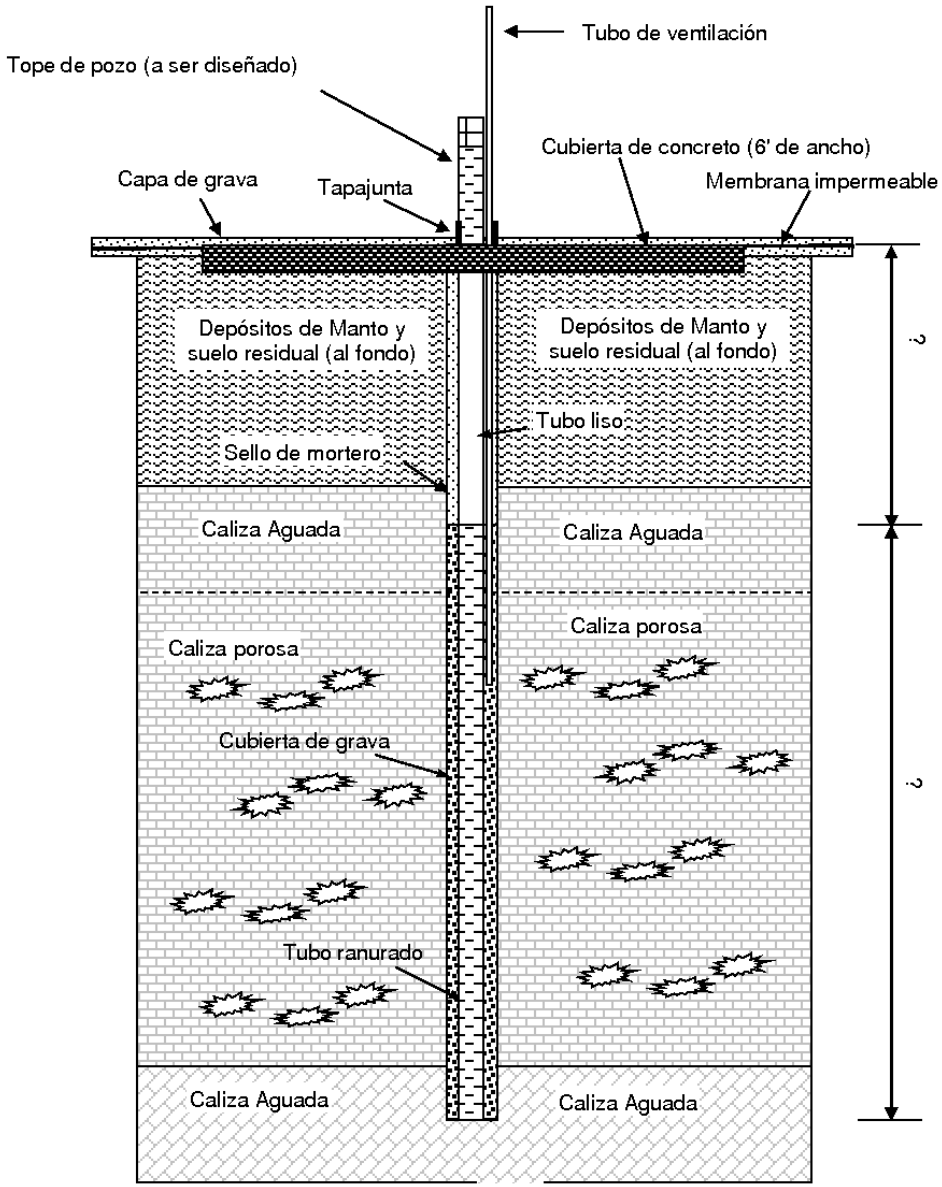
Niveles potenciométricos en el acuífero freático entre 1980 y 1990, noroeste de Puerto Rico



GEO ENGINEERING

FIGURA 25

Charca de Retención con Pozos de Inyección



(Esquemático) Pozo de Inyección

GEO ENGINEERING

FIGURA 26

Sección Transversal de Pozos de Inyección

APÉNDICE UNO

Informe Geológico de GeoCim

AUTORIDAD DE CARRETERAS Y TRANSPORTACION

CORREDOR HATILLO - AGUADILLA

DECLARACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL PRELIMINAR

APÉNDICES

VOLUMEN II

C. Evaluación Geológica

D. Estudio Hidrológico

MAYO 2007

Departamento de Transportación y Obras Públicas

EVALUACIÓN GEOLÓGICA

SUELOS

C

GeoCim LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS

Partners
Luis Oscar García, MSCE, CE, PE
Carlos García Echevarría, MSCE, PE
James A. Baigés, MSCE, PE

Associate
Alejandro E. Soto, MS, PG

EVALUACIÓN GEOLÓGICA
ALTERNA CAMPO TRAVIESA
CORREDOR HATILLO-AGUADILLA
AC-220124

Mayo de 2006

I. INTRODUCCION

La Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico (ACT) evalúa varias alternativas para mejorar la infraestructura de tránsito entre los Municipios de Hatillo en la parte norte-central de Puerto Rico y Aguadilla en el extremo noroeste de la isla. Una de las opciones que se consideran es extender la Autopista de Diego (PR-22) desde su actual terminal en Hatillo hasta Aguadilla. La ACT ha identificado una franja de 250 a 500 metros de ancho y aproximadamente 46.0 kilómetros de largo para estudio preliminar y evaluación de posibles impactos ambientales de construirse una nueva carretera (ancho promedio del proyecto y servidumbre de unos 90 metros) dentro de este denominado Corredor Hatillo-Aguadilla (Alterna Campo Traviesa). Este informe describe la geología del Corredor Hatillo-Aguadilla y representa el componente geológico de la evaluación para la Declaración de Impacto Ambiental Preliminar (DIA-P) que la firma Guillermety, Ortiz & Asociados (GOA) prepara para la ACT, dueño y proponente del proyecto.

La Alterna Campo Traviesa discurre por terrenos rurales al sur y este de la Carretera PR-2 (Figura 1) en la parte occidental de la Zona Kársica del Norte de Puerto Rico. El Corredor comienza (Estación 0+00) al sur de la Estación de Peaje de Hatillo en la Autopista PR-22 existente y se dirige hacia el oeste-noroeste a través de los Barrios Corcovado y Capáez del Municipio de Hatillo (Figura 1-1). Cerca de la Estación 45+00 la alineación cruza la Carretera PR-130 y curvea al suroeste hacia el valle del Río Camuy, el cual cruza entre las Estaciones 66+00 y 68+00. Tras pasar el río continúa hacia el oeste-suroeste entrando al Barrio Zanja del Municipio de Camuy donde interseca la Carretera PR-486 cerca de la Estación 90+00. De ahí

continúa con rumbo oeste-suroeste por el Barrio Ciénagas cruzando la Carretera PR-119 en la Estación 112+00, adentrándose después al Barrio Camuy Arriba donde llegando a la Estación 126+00 toma un giro al suroeste (Figura 1-2).

A la altura de la Estación 141+00 la alineación entra al Municipio de Quebradillas y sigue un rumbo este a oeste atravesando los Bos. Cocos y Cacao hasta llegar a los cerros que bordean el Río Guajataca cerca de la Estación 190+00. En este tramo cruza las carreteras PR-482 (Estación 144+00), PR-481 (Estación 162+50), PR-113 (Estación 176+00) y PR-480 (Estación 188+00). Entre las Estaciones 190+00 y 210+00 el Corredor mantiene un rumbo oeste-noroeste atravesando los cerros que bordean el lado este del Río Guajataca (Figura 1-3). Cruza el río, que está encausado en un profundo cañón cuyas paredes alcanzan más de 170 metros (560 pies) sobre su lecho entre las Estaciones 210+00 y 216+00 y entra al Barrio Llanadas del Municipio de Isabela con rumbo este a oeste. Cruza la Carretera PR-446 cerca de la Estación 224+00 y se adentra en la cuenca de la Quebrada La Sequia, la cual atraviesa con rumbo oeste-noroeste llegando al Barrio Galateo Bajo, también de Isabela.

El tramo entre las estaciones 250+00 y 262+00 define una amplia curva en que el rumbo de la alineación cambia al suroeste (Figura 1-3). El tramo, que termina en el Barrio Arenales Bajos de Isabela, interseca las carreteras PR-474 y PR-475 y cruza el Canal Principal de Derivación en varios lugares. La ruta continúa con rumbo suroeste a oeste-suroeste intersecando el Canal de Moca y las carreteras PR-4494 y PR-112 entrando al Barrio Aceitunas del Municipio de Moca alrededor de la Estación 306+50 (Figura 1-4). De aquí hasta aproximadamente la Estación 368+00 en el Barrio Caimital Alto de Aguadilla la alineación forma dos amplias curvas cruzando las carreteras PR-464, PR-110 y PR-462; este tramo también incluye varios cruces del Canal de Moca.

Tras cruzar la PR-462 (Estación 364+00) la alineación se mantiene con rumbo suroeste hasta llegar al margen de la Cordillera Jaicoa en el Barrio Caimital Bajo de Aguadilla (Figuras 1-4 y 1-5). Luego de pasar la Carretera PR-443 (Estación 386+00) el Corredor se adentra y cruza la topografía accidentada de la Cordillera Jaicoa formando un patrón de "S" en que la orientación cambia de noroeste a suroeste y finalmente sureste (Figura 1-5). Cerca de la Estación 440+00, en el Barrio Victoria de Aguadilla, la alineación atraviesa los Cerros de Viñet y comienza la bajada

hacia el Valle del Río Culebrinas. Finalmente cruza la Carretera PR-111 cerca de la Estación 446+00 y entra a la llanura de inundación del Culebrinas, llegando a la intersección con la Carretera PR-2 (Estación 462+46.50) en el Barrio Palmar de Aguadilla.

II. AMBITO DE TRABAJO

Para este proyecto se realizaron las siguientes actividades:

1. Recopilación y repaso de información existente sobre la geología del area. En su mayoría esta consiste de publicaciones del Servicio Geológico Federal (USGS por sus siglas en Inglés) las cuales se pueden agrupar en 3 categorías: estudios geológicos que incluyen evaluaciones a nivel regional y cartas o mapas a escala de 1:20,000, estudios sobre la hidrogeología de la región y estudios sobre la geomorfología[1] del área. El Apéndice A provee un listado de estas publicaciones. Otro documento evaluado fue el informe del estudio arqueológico para el proyecto del Corredor preparado por el Centro de Investigaciones Arqueológicas Bieque (Rivera Calderón y Martínez Torres, 2004).
2. Antes de comenzar el recorrido de campo se celebraron reuniones con el Presidente de la organización Amigos del Karso y con los directores de 2 entidades espeleológicas, la Sociedad Espeleológica de Puerto Rico (SEPRI) y la Sociedad de Estudios Espeleológicos del Norte, Inc. (SEENI). A éstos se les proveyó un mapa de la ruta y se les solicitó información sobre cuevas de su conocimiento ubicadas a lo largo del Corredor. También se consultaron inventarios de cuevas preparados por el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (que fue provisto por SEPRI) y el USGS (Monroe, 1976).
3. Estudio de fotointerpretación: Obtuvimos fotografías aéreas de la ruta correspondientes a los años 1936, 1950, 1963, 1971, 1983, 2003 y 2005 (Tabla 1). Estas fueron estudiadas para evaluar las características superficiales del terreno a lo largo del Corredor con énfasis en la identificación de procesos geológicos que

pudiesen impactar la propuesta carretera (primordialmente deslizamientos y desarrollo de sumideros).

4. Reconocimiento de campo: Realizamos una serie de visitas al campo con el propósito de caminar la ruta y poder observar la geología de la alineación. La mayoría de las visitas se realizaron en conjunto con representantes de Reforesta, entidad encargada de realizar la evaluación biológica de la ruta. Durante el recorrido buscamos afloramientos de los materiales del subsuelo y evidencia de los procesos superficiales que operan en el área. La alineación tiene unos 46 kilómetros de largo y entre 250 y 500 metros de ancho. El terreno a lo largo del Corredor varía de levemente ondulado a fuertemente accidentado con cubierta vegetal tan diversa como pastos bajos de fácil acceso a bosques llenos de lianas que son impenetrables para un caminante, y la vegetación más densa usualmente ocurre en las áreas de topografía más difícil. Por lo general, el recorrido se hizo partiendo desde la línea de centro del Corredor, que fue marcada con varillas de acero y tubos PVC colocados a intervalos de 100 a 200 metros por el agrimensor del proyecto hace unos 2 a 3 años. Desafortunadamente, muchas de las marcas han desaparecido o están cubiertas por vegetación lo que dificultó el recorrido en algunas áreas.
5. Análisis de datos y preparación de este informe.

III. GEOLOGIA DEL KARSO DEL NORTE DE PUERTO RICO

La Alterna Campo Traviesa cruza la parte occidental de la Zona Kársica del Norte de Puerto Rico, una de las 3 regiones fisiográficas de la Isla[2] (Figura 2). Karso es el nombre que se le da a la topografía que se produce en áreas de roca caliza en las que el carbonato de calcio que compone la roca se ha disuelto parcialmente. El Karso de Puerto Rico exhibe la mayoría de los rasgos asociados a esta topografía, incluyendo una variedad de colinas y cerros calizos y depresiones superficiales o sumideros. El tamaño y la densidad de estos rasgos no es uniforme a

[1] Geomorfología es el estudio de la formación y evolución de los rasgos que componen el paisaje.
[2] Monroe, W.H., 1976; *The Karst Landforms of Puerto Rico*; U.S. Geological Survey Professional Paper 899, 69p.

través de la región reflejando variaciones en la manera en que las calizas subyacentes se han disuelto. Otra característica del Karso es que la mayor parte de la región carece de un sistema integrado de drenaje superficial. Con la excepción de varios ríos principales que nacen en la región montañosa del interior de la isla y cruzan el Karso de sur a norte, el drenaje de la mayor parte de la zona es interno o subterráneo[3]. La escorrentía que se genera durante un evento de lluvia discurre hacia los sumideros donde se infiltra al subsuelo a través de una variedad de orificios (que varían desde diminutas cavidades a cuevas y cavernas[4]) formados al disolverse la caliza. Una vez en el subsuelo, el agua ahora subterránea migra vertical y lateralmente hacia el manto freático para nutrir acuíferos calizos que representan un importante recurso de agua subterránea para la región.

El USGS ha publicado varios estudios sobre la geología e hidrogeología de la región kársica del norte de Puerto Rico, incluyendo cartas (mapas) geológicas e informes y artículos técnicos (ver Apéndice A). Estos describen la geología del área como una secuencia de estratos calizos y siliciclásticos que fueron depositados durante el Terciario[5] medio a superior (épocas Oligocénica a Pliocénica) sobre un basamento de roca ígnea y sedimentaria deformada que data del Cretácico al Terciario inferior. Los estratos del Karso han sido subdivididos en varias unidades o formaciones geológicas cuya distribución se ilustra en la Figura 3 tomada de una de las publicaciones recientes del USGS[6]. Las formaciones tienen un leve declive hacia el norte[7] (ver perfiles en la Figura 4), lo que en combinación con el incremento gradual en la elevación del terreno desde la costa del Atlántico hacia el interior de la isla produce el patrón de afloramiento observado consistente de franjas orientadas de este a oeste.

---

[3] Los ríos que cruzan el Karso son el Guajataca, Camuy, Arecibo (y su tributario el Tanamá), Manatí, Cibuco y La Plata. El Corredor cruza dos de estos, los Ríos Camuy y Guajataca.

[4] Monroe (1976) define cueva como una cavidad o pasaje subterráneo lo suficientemente grande para que pueda entrar un ser humano. Caverna se refiere a una cueva grande.

[5] Periodo de tiempo geológico que comenzó hace aproximadamente 65 millones de años y terminó hace unos 1.8 millones de años. Se subdivide en 5 Epocas denominadas (las cifras en paréntesis indican la edad de la roca mas joven de la correspondiente Epoca) Paleoceno (58 millones de años), Eoceno (37 millones), Oligoceno (24 millones), Mioceno (5.3 millones) y Plioceno (1.8 millones).

[6] Renten, R.A., Ward, W.C., Gill, I.P., Gómez-Gómez, F., Rodríguez-Martínez y otros, 2002; *Geology and Hidrogeology of the Caribbean Islands Aquifer System of the Commonwealth of Puerto Rico and the U.S. Virgen Islands*, U.S. Geol. Survey Professional Paper 1419; 139p.

[7] Este declive refleja en parte la inclinación original de la superficie de deposición y posiblemente un leve arqueamiento del bloque de corteza que contiene a Puerto Rico.

La formación de la secuencia del Terciario medio a superior comenzó a mediados del Oligoceno, época en que el paisaje de la antigua isla era diferente al del Puerto Rico de hoy. La Cordillera Central alcanzaba elevaciones sobre dos veces las actuales, y el mar estaba más distante de las montañas que al presente. El Karso no existía; el área que hoy día ocupa era una superficie irregular de poco relieve en que las rocas del basamento estaban expuestas a la intemperie y sujetas a meteorización y erosión. Los ríos de la época transportaban el sedimento producto de ese desgaste hacia el norte donde se depositaba en llanuras aluviales y en deltas y ambientes costeros de la distante costa. A mediados del Oligoceno comenzó un periodo de fluctuaciones en la elevación del nivel del mar referente a la antigua isla y durante una serie de avances (trasgresiones) y retiradas (regresiones) del mar fue que se acumuló el sedimento que forma la secuencia del Terciario medio a superior.

Las unidades que componen la secuencia son, en el orden en que se formaron (de mayor a menor edad): Formación San Sebastián, Caliza Lares, Arena Mucarabones, Formación Cibao (subdividida en varias unidades secundarias o Miembros), Caliza Aguada (Los Puertos)[8], Caliza Aymamón y Caliza Quebradillas (Camuy). A continuación aparece una breve descripción de cada unidad.

1. Formación San Sebastián: La Formación San Sebastián ocurre como una franja discontinua en el margen sur del Karso entre Moca y San Juan (*Ts* en la Figura 3). Es el producto del primer avance marino (trasgresión) que fue acompañado por una migración tierra adentro de los focos de sedimentación aluvial y costeros. La formación consiste de arcillas, arenas y gravas terrígenas depositadas en llanuras aluviales y deltas entremezcladas con sedimentos ricos en materia orgánica depositados en pantanos y lagunas. Con tiempo, la mayor parte de la cuenca quedó sumergida y en la parte alta de la formación encontramos estratos calizos indicativos de ambientes marinos de poca profundidad. Aunque algunos de estos depósitos presentan cementación, la mayoría clasifica como suelos firmes a duros o densos.

[8] Los nombres en paréntesis son nombres alternos usados por algunos investigadores. Este informe generalmente utiliza la terminología que aparece en los mapas geológicos publicados por el USGS ya que estos son los documentos geológicos de mayor acceso a la comunidad general.

2. Caliza Lares: El avance marino continuó y la profundidad de las aguas fue aumentando de manera que para fines del Oligoceno existía una extensa plataforma marina a la que llegaba poco sedimento terrígeno, condiciones ideales para la formación de arrecifes y la acumulación de sedimento calcáreo. La Caliza Lares consiste mayormente de estratos calizos relativamente puros, muchos de ellos ricos en fósiles de invertebrados marinos. Estos se acumularon sobre los sedimentos de la Formación San Sebastián, pero en algunos lugares había colinas que formaban islas durante la sedimentación de la San Sebastián; aquí la caliza Lares se depositó directamente sobre las rocas viejas del basamento rocoso. La Caliza Lares aflora de forma más o menos continua entre los Municipios de Moca y Corozal (*Tlf* en la Figura 3).
3. Arena Mucarabones: Al este de la plataforma de carbonatos de la Caliza Lares, en el área actual entre el Río Grande de Manatí y la parte oeste de la Zona Metropolitana de San Juan, predominaba un ambiente aluvial a deltáico. Los sedimentos que aquí se acumularon han sido asignados a la Arena Mucarabones (*Tms* en la Figura 3). Estos consisten de areniscas, conglomerados y lodolitas, muchos de los cuales se han meteorizado y hoy día afloran como arenas y arcillas.
4. Formación Cibao: La Formación Cibao es la unidad más variada de la secuencia del Terciario medio a superior, reflejando lo que parece haber sido un complejo patrón de levantamiento y hundimiento tanto en la isla ancestral como en la plataforma marina temprano en el Mioceno (Renken y otros, 2002), con importantes consecuencias sobre los patrones de sedimentación a través de la cuenca. El USGS dividió el sedimento de esta unidad en seis miembros, 5 de los cuales se ilustran en la Figura 3. Estos incluyen secuencias de sedimento mayormente terrígeno: el Miembro Guajataca (Tcg en la Figura 3) y la Arena Miranda (la cual no aparece en la Figura 3 pero ocurre en la parte este de la Formación), sedimento predominantemente calcáreo: la Caliza Montebello (*Tm* en la Figura 3), la Caliza Río Indio (*Tr*) y la Caliza Quebrada Arenas (*Tqa*), y mezclas de sedimento calcáreo y terrígeno: el Miembro Cibao no-diferenciado (*Tc*). Este último es el de mayor extensión y consiste predominantemente de calizas arcillosas y lodolitas y lutitas calcáreas (margas) localmente intercaladas con algunos

estratos calizos. Aflora en una franja que se extiende entre Aguadilla y Bayamón, excepto entre el Río Grande de Arecibo y el Municipio de Florida donde aflora la Caliza Montebello, el segundo miembro en extensión. La Caliza Montebello consiste mayormente de calizas depositadas en una plataforma calcárea de poca a moderada profundidad que incluía arrecifes de coral. Mientras estas se formaban, al este y oeste se acumulaban los sedimentos mixtos del Miembro Cibao.

5. Caliza Aguada (Los Puertos): El nivel del mar estaba aumentando a través de la plataforma durante la etapa final de la deposición de la Formación Cibao. Esta trasgresión continuó hasta el Mioceno medio llevando a la acumulación de sedimento predominantemente calcáreo de la Caliza Aguada (Los Puertos), que hoy aflora como una banda continua entre Aguadilla y Toa Baja (*Tal* en la Figura 3). Esta unidad consiste mayormente de calizas cristalinas y calcarenitas, frecuentemente ricas en fósiles. Este ciclo de sedimentación concluyó con una regresión marina de carácter regional durante la cual la superficie de la unidad quedó expuesta y comenzó a sufrir karsificación.
6. Caliza Aymamón: Poco después, otro avance del mar inundó toda la plataforma y comenzó a depositarse el sedimento de la Caliza Aymamón. Del interior llegaba poco sedimento terrígeno, de manera que la Aymamón contiene las calizas mas puras de la secuencia del Terciario medio a superior. La Formación, que es rica en fósiles, incluye estratos de tiza, calcarenitas, caliza cristalina y brechas de caliza. Para fines del Mioceno medio el mar volvió a retroceder, quedando expuesta la Caliza Aymamón dando paso al comienzo de la extensa karsificación de esta unidad. Hoy día la Caliza Aymamón aflora como una banda discontinua entre Aguadilla y Loiza (*Tay*) en la Figura 3). Al este del Río Grande de la Plata gran parte de la unidad está cubierta por sedimento aluvial y costero; lo mismo sucede al oeste del río, pero la cubierta aquí consiste de lo que se ha denominado Depósitos de Manto ("Blanket Deposits"). Los Depósitos de Manto son suelos compuestos por arcilla, limo, arena fina (en su gran mayoría cuarzo) y óxidos (que le imparten el color rojizo que los caracteriza) y de acuerdo a Briggs (1966) representan el residuo de la meteorización de un manto de

sedimento aluvial/costero depositado sobre las calizas a medida que el mar se fue retirando.

7. Caliza Quebradillas (Camuy): A fines del Mioceno y principios del Plioceno la isla volvió a ser inundada por el mar, depositándose la Caliza Quebradillas (Camuy). Esta consiste mayormente de tizas y calcarenitas que frecuentemente tienen un contenido relativamente alto de cuarzo y compuestos de hierro. Monroe (1980) dividió la formación en 3 miembros que denominó inferior, medio y superior. La Caliza Quebradillas (Camuy) aflora cerca de la actual costa del Atlántico, mayormente al oeste del Río Grande de Arecibo (*Tq* en la Figura 3). Al igual que con la Caliza Aymamón, parte del afloramiento está cubierto por Depósitos de Manto.

La regresión que puso fin a la deposición de la Caliza Quebradillas (Camuy) dio paso a los procesos de meteorización y erosión que crearon y continúan modificando el Karso del Norte de Puerto Rico. La diversidad en la composición y textura de las formaciones del Terciario medio a superior se refleja en la variedad de paisajes que componen la geomorfología del Karso. Dos factores han sido claves en la evolución de estos paisajes. Primero, los estratos calizos más puros son más susceptibles a disolución y es en las formaciones de más carbonato de calcio donde observamos la topografía más accidentada con los cerros calizos más altos y empinados y las depresiones cerradas o sumideros más profundos. Algunas de las zonas más inaccesibles de Puerto Rico ocurren en el afloramiento de calizas de alta pureza, notablemente en partes del afloramiento de las Calizas Lares, Montebello, Aguada y Aymamón. Al otro extremo está el afloramiento del Miembro Cibao no-diferenciado de alto contenido terrígeno en que el paisaje está dominado por rasgos producidos por erosión fluvial y cuyo drenaje es completamente superficial. Este contraste se acentúa en un número de quebradas que nacen en el afloramiento del Cibao no-diferenciado y fluyen hacia el norte donde desaparecen al llegar a sumideros en la Caliza Aguada.

El segundo factor importante en la evolución del Karso es la permeabilidad de la roca caliza: a mayor permeabilidad, mayor flujo de agua subterránea, y por consecuencia, mayor la disolución. La permeabilidad de las formaciones calizas puede ser regida por la textura original

de la roca o por discontinuidades en la masa rocosa[9] las cuales tienden a ser mas permeables que la roca misma. Uno de los elementos importantes del paisaje kársico a lo largo de la ruta del Corredor es la presencia de hileras de colinas y montes calizos (llamados mogotes) que corren de este a oeste entre valles y llanos de igual orientación. Recordemos que los estratos de las formaciones del Terciario medio a superior tienen este mismo rumbo y un declive leve hacia el norte, lo que hace que afloren como franjas paralelas (Figuras 3 y 4). En una secuencia de estratos que muestran resistencia variable a la meteorización y erosión, los estratos más débiles se desgastarán mas rápidamente, creando un paisaje de sierras (estratos resistentes) y valles (estratos débiles) paralelos. En el caso de las calizas, las unidades más débiles son los materiales más permeables que han experimentado mayor disolución, lo que ocasiona que las superficies de estas calizas se encuentren mas deprimidas que las que corresponden a los estratos menos permeables (mas resistentes) que componen las hileras de mogotes. Fue en estas cuencas que se acumularon los sedimentos cuya meteorización creó los Depósitos de Manto que hoy día llenan los llanos que alternan con las hileras de mogotes a través del Karso del Norte de Puerto Rico.

Finalmente, muchas de las colinas o sierras calizas exhiben un perfil asimétrico con pendientes mas empinadas en su lado sur que en la cara norte. Cuando el declive leve del lado norte se aproxima a la inclinación de los estratos a la superficie se le da el nombre cuesta, y la cara empinada del lado sur se conoce como escarpe de cuesta. Algunos de los rasgos mas sobresalientes de la topografía Kársica del norte de Puerto Rico son escarpes de cuesta que ocurren donde afloran los contactos entre las formaciones del Terciario medio a superior.

IV. GEOLOGIA DEL CORREDOR

La Alterna Campo Traviesa cruza solo 4 de las formaciones geológicas que componen la secuencia del Terciario medio a superior (Figura 3), en gran medida debido a que la mayor parte de la ruta discurre en dirección este a oeste, o sea, paralelo a las franjas que forman el patrón de afloramiento de las formaciones. La mayor parte de la ruta se mantiene en la calizas Quebradillas

[9] Discontinuidades son rasgos que interrumpen la continuidad de una masa rocosa; ejemplos son las superficies de contacto entre dos estratos, o fracturas que se formaron en la roca después de ésta haberse formado.

(Camuy) y Aymamón. No es hasta cerca de la Estación 403+00 que la alineación toma un rumbo norte a sur y cruza afloramientos de la Caliza Aguada (Los Puertos) y la Formación Cibao (el Miembro Cibao no-diferenciado). Los estratos de estas cuatro formaciones serán la fundación sobre la cual se habrá de construir el nuevo expreso, excepto en varios tramos donde estos están cubiertos por suelos de formación Cuaternaria[10]. Esto incluye una parte significativa del afloramiento de la Caliza Aymamón en que los estratos calizos están cubiertos por los suelos residuales[11] denominados Depósitos de Manto. También hay dos tramos en que la fundación de la ruta consiste de suelo aluvial (bordeando el Río Camuy y en el tramo final en el valle del Río Culebrinas) y otro en que consiste de depósitos de deslizamientos (al sur de los Cerros Viñet).

A continuación se describe la geología del Corredor en base a los cuadrángulos geológicos publicados por el USGS (Figura 5) y las observaciones hechas en el campo. Las descripciones del USGS corresponden a formaciones que afloran en áreas relativamente extensas, y aunque son por ende algo genéricas, podrían incluir materiales que no ocurren a lo largo del Corredor. También ocurre lo opuesto, o sea, se observaron materiales terrestres que no se mencionan en las descripciones del USGS. Con estas limitaciones en mente se incluye descripciones basadas en la textura de las rocas vistas en el campo (frecuentemente dadas en paréntesis) que complementan las de los cuadrángulos geológicos. La alineación se ha divido en tramos de geología y topografía similar para facilitar esta descripción.

A. Estación 0+00 a 45+00 (Hatillo)

Entre las Estaciones 0+00 y 45+00 la alineación sigue una hilera de colinas de pendientes suaves a moderadas compuestas mayormente por el miembro intermedio (*Tcm* en la Figura 5-1) de la Caliza Quebradillas (Camuy); al norte y sur hay otras hileras de colinas calizas, las del norte compuestas por el miembro superior (*Tcu*) de la Caliza Quebradillas (Camuy), las del sur por el miembro inferior (*Tcl*) y la Caliza Aymamón

[10] El Cuaternario es el Periodo geológico que sigue al Terciario y que representa los últimos 1.8 millones de años de nuestro planeta Tierra. Se subdivide en 2 Epocas: el Pleistoceno que cubre el intervalo entre 1.8 millones y 12,000 años antes del presente, y el Holoceno que representa los últimos 12,000 años.

[11] Un suelo residual es uno formado por la meteorización de una roca o suelo antecedente y que se encuentra en el sitio de formación, o sea, no ha sufrido transporte (se dice que se encuentra *en-situ*).

(*Tay*). Entre las hileras hay llanos cuyo piso consiste de Depósitos de Manto (*Qbs*). Llegando a la Estación 43+00, el tramo entra a una sección en que aflora el miembro superior de la Caliza Quebradillas (Camuy), la cual ocupa la cresta de las últimas dos colinas del tramo (*Tcu*).

El USGS describe el Miembro Intermedio de la Caliza Quebradillas (Camuy) como caliza (mayormente calcarenita) rica en óxido de hierro cuyo carácter físico es competente y fuerte. Esta aflora a través de las colinas del área y frecuentemente ocurre como fragmentos sueltos tamaño grava a peñas de 2 o más metros de diámetro regados sobre la superficie. También hay estratos de calcilutita y caliza pedregosa ("rubbly limestone") que afloran en algunos cortes. De acuerdo al USGS, el miembro superior de la Caliza Quebradillas (Camuy) consiste de creta ("chalk"), creta arenosa y caliza arenosa (la arena siendo cuarzo en ambos casos). En un corte de esta unidad en la PR-130 también observamos un conglomerado calcáreo en que los clastos son fragmentos calizos y la matriz es predominantemente carbonato de calcio.

Las calizas de los miembros intermedio y superior de la Caliza Quebradillas (Camuy) que afloran en el Corredor usualmente son firmes y competentes, particularmente aquellas de carácter ferruginoso. En muchos lugares la caliza parece estar recristalizada y frecuentemente está carcomida por cavidades de diversos tamaños. Se identificó una cueva grande cerca del eje del Corredor al sur de la Estación 34+00 (Figura 6-2). Esta cueva, que algunos vecinos llamaron Cueva de la Zarza y otros dicen no tiene nombre, fue explorada por el equipo arqueológico del proyecto, quienes indican tiene varias cámaras y mas de 80 metros de pasajes. En un corte en la Carretera PR-130 también se ve una cavidad que según un vecino es una pequeña cueva que fue rellenada porque amenazaba con colapsar el borde de la carretera.

Los Depósitos de Manto que ocupan los llanos son suelos arenosos descritos como arenas, arenas limosas, limos arenosos y arenas arcillosas. No se obtuvo data referente al espesor o las propiedades físicas de estos suelos pero por lo general son suelos firmes. Finalmente, las calizas frecuentemente están cubiertas por suelos

residuales y/o coluviales[12]. Los suelos residuales y coluviales que ocurren en las lomas y sus laderas son limosos/arcillosos y usualmente contienen fragmentos de roca caliza. El espesor de estos suelos varía de centímetros a más de un metro y, como es de esperarse, tiende a aumentar hacia la falda de las lomas.

El drenaje de la zona es parcialmente interno vía sumideros y parcialmente superficial y, casualmente, el eje del Corredor sirve como divisoria aproximada entre los dos tipos de drenaje. Las Figura 6-1 y 6-2 muestran los rasgos superficiales que se identificaron en la vecindad del Corredor incluyendo sumideros. Al norte del eje hay unos pocos sumideros que recogen parte de la escorrentía, pero el drenaje es mayormente superficial con varias quebradas intermitentes[13] que desaguan en el Océano Atlántico y, en la parte oeste del tramo, hacia el Río Camuy. Al sur del eje hay un número mayor de sumideros y estos reciben gran parte de la escorrentía del área.

Varios de los sumideros ocurren a lo largo, o cerca del eje del Corredor. El piso de estos, y de la mayoría de los sumideros identificados consiste primordialmente de suelos de los Depósitos de Manto, lo que los identifica como sumideros de colapso. Estos se forman cuando agua que infiltra por el Depósito de Manto remueve parte del suelo y lo transporta a través de cavidades en la caliza subyacente. Este proceso puede ocurrir gradualmente, ocasionando un asentamiento paulatino del terreno, o súbitamente, causando un colapso repentino (ver Figura 7).

B. Estación 45+00 a 80+00 (Hatillo a Camuy)

Este tramo se extiende desde la Carretera PR-130 a través de las colinas que bordean el lado este del valle del Río Camuy, cruza el cañon del río, y continúa por la cresta de una sierra caliza levemente ondulada que se extiende hacia el oeste. El tramo se caracteriza por tener un sistema integrado de drenaje superficial que descarga al río, el

[12] Coluvión se refiere al material que se acumula en las laderas inferiores de las pendientes producto de una gama de procesos activos en los taludes, incluyendo erosión y transporte por escorrentía, deslizamientos, reptación, y el transporte y mezcla de sedimento por actividad de organismos. Nótese que estos materiales no se identifican en los mapas del USGS.

[13] La Quebrada Seca (Figura 1) es la mayor de estas quebradas.

cual discurre en una angosta planicie limitada por fuertes pendientes. Al este del río la topografía se caracteriza por colinas redondeadas de pendientes mayormente suaves que se tornan más empinadas a medida que se acercan al desfiladero del río. En el lado occidental, la topografía es más suave siendo dominada la sierra caliza que exhibe poco relieve y lomas suaves.

De acuerdo al USGS, entre las Estaciones 45+00 y 50+00 afloran los miembros superior e intermedio de la Caliza Quebradillas (Camuy). El miembro intermedio también aflora en las crestas de las colinas más altas al oeste de la Estación 50+00. El resto del tramo discurre sobre el miembro inferior de la Caliza Quebradillas (Camuy), excepto en la parte baja de las paredes del desfiladero del Río Camuy donde aflora la Caliza Aymamón (*Tcl* y *Tay* en la Figura 5-1, respectivamente). Los materiales no-consolidados[14] del tramo incluyen suelo residual/coluvial que forma un manto intermitente sobre las calizas en las colinas, sedimento aluvial en la llanura de inundación del Río Camuy y Depósitos de Manto en los llanos que bordean la sierra al oeste del río.

Los estratos que componen los miembros intermedio y superior de la Caliza Quebradillas (Camuy) son similares a los observados en el tramo inicial. Sin embargo, cerca de la Estación 57+00 en lo que se identifica como miembro intermedio hay cortes en que aflora una grava calcárea que es similar a la que se observó en el miembro superior del tramo anterior.

De acuerdo al USGS, el miembro inferior consiste de capas finas de marga gredosa (calcilutita) que contiene algunos estratos de caliza endurecida (calcarenita). En adición, cerca de la Estación 53+00 hay un pequeño afloramiento donde hay un estrato de caliza recristalizada sobre un horizonte de limo terrígeno de poca cementación. Finalmente, en varios cortes en la vecindad de la Estación 60+50 la caliza que aflora es

[14] En este escrito el término consolidado se define en el sentido utilizado en la literatura geológica, el cual difiere del uso en la ingeniería geotécnica, donde se refiere al proceso de consolidación que envuelve la densificación de un suelo arcilloso mediante la extrusión de agua de sus vanos. En el uso geológico, un material no-consolidado es un sedimento que no ha sufrido cementación o litificación, o sea, un material cuyas características geotécnicas corresponden a las de un suelo. Un material geológico consolidado se comporta como una roca.

rica en óxido de hierro. Las calizas de esta unidad que afloran generalmente son competentes y muestran un grado moderado a alto de recristalización.

El USGS muestra la Caliza Aymamón aflorando en los 40 a 50 metros inferiores de las paredes del valle del Río Camuy. La unidad se describe como estratos gruesos a masivos de greda y caliza dura de alta pureza. Los pocos afloramientos de esta formación que se observaron consisten de caliza altamente recristalizada lo que dificulta identificar el material original. En adición, la roca de la parte inferior del cañón del Río Camuy está cubierta por un extenso manto de material coluvial de manera que el afloramiento de la formación es menor de lo que implica el cuadrángulo geológico.

La superficie de las calizas a través del tramo usualmente está parcial o totalmente recristalizada, y frecuentemente contienen cavidades donde el material calcáreo se ha disuelto. No obstante, no ostentan tantas cavidades como se observan en las calizas en otros tramos de la alineación, incluyendo el tramo inicial. Las cavidades más significativas que se observaron consisten de varias pequeñas cuevas y refugios rocosos ("rock shelters") en las paredes del valle del Río Camuy. SEPRI identificó la localización de dos cuevas en la pared este del valle, pero estas no fueron vistas.

Los suelos residuales que cubren parte de las colinas y sierras son mayormente limosos y/o arenosos. El espesor máximo de estos suelos no es conocido pero generalmente no parece exceder un metro. Los suelos coluviales abundan en las partes bajas de las cañadas tributarias al Río Camuy, donde se observaron espesores de 2 a 3 metros, y en los márgenes del valle del mismo Río Camuy donde forman un talud moderado sobre el acantilado rocoso de la Caliza Aymamón. El espesor de este manto coluvial probablemente sobrepasa los 10 metros e incluye bloques de caliza de más de 3 metros en diámetro. En las fotos aéreas se puede ver varias cicatrices de deslizamiento en las paredes del acantilado y en las laderas de varios de los valles tributarios al Río Camuy. Las cicatrices, que se identifican en la Figuras 6-2 y 6-3, fueron producidas por desprendimientos recientes (relativo a la fecha en que se tomaron las fotos) y apuntan a la fuente principal de los materiales coluviales.

En aproximadamente los últimos 600 metros de este tramo del Corredor (Estaciones 74+00 a 80+00), al pie de la sierra de Caliza Quebradillas (Camuy) afloran Depósitos de Manto. Estos suelos parecen ser mayormente arcillosos y de consistencia firme.

C. Estación 80+00 a 190+00 (Camuy a Quebradillas)

Poco después de la Estación 80+00, el centro de la carretera baja de la sierra de Caliza Quebradillas (Camuy) y entra a una llanura levemente ondulada que se extiende hacia el oeste entre la sierra y una hilera de colinas de Caliza Aymamón que bordea el lado sur de la llanura (Figuras 1-1 y 1-2). Este paisaje consistente de un llano de poco relieve alongado en dirección este-oeste y bordeado al norte y sur por sierras e/o hileras de lomas calizas componen un elemento típico de la topografía del afloramiento de la Caliza Aymamón entre Bayamón y Aguadilla, y es el panorama dominante a lo largo del Corredor entre Camuy y Aguadilla. El piso de las llanuras consiste de Depósitos de Manto cuyo espesor puede sobrepasar 20 metros. Los llanos drenan internamente vía numerosos sumideros de perfil mayormente suave que hay esparcidos por las llanuras. La mayoría de los sumideros son relativamente pequeños, con áreas superficiales de menos de media cuerda, pero algunos cubren más de 100 veces esto. La mayoría no sobrepasa 5 metros de profundidad, aunque localmente ocurren depresiones más profundas. Aunque en los llanos ocurren algunas colinas calizas, la mayor parte del área de las planicies consiste de las pendientes de los sumideros, siendo los puntos altos las divisorias entre las depresiones. Las lomas calizas que bordean los llanos (y las pocas que ocurren en ellos) usualmente no sobrepasan unos 30 a 50 metros sobre el nivel de las llanuras. Las lomas, que son conocidas como mogotes o pepinos, frecuentemente son asimétricas con pendientes más fuertes en los lados sur y oeste; otras tienen forma cónica con laderas casi verticales.

Entre las Estaciones 80+00 y 130+00 el Corredor discurre por el llano entre la sierra de Caliza Quebradillas (Camuy) al norte (*Tcm* y *Tca* en la Figuras 5-1 y 5-2) y una hilera de mogotes en la Caliza Aymamón al sur (*Tay*). Llegando a la Estación 126+00 la

alineación gira al suroeste y cruza la hilera de mogotes entrando a otra llanura, ésta bordeada al norte y sur por colinas de Caliza Aymamón. La ruta entonces continúa por el llano con rumbo oeste hasta llegar a los cerros que bordean el Río Guajataca (Estación 190+00). Salpicados por las llanuras hay numerosos sumideros en los Depósitos de Manto (ver Figuras 6-4 y 6-5), una colina de Caliza Quebradillas (Camuy) y varias colinas de Caliza Aymamón (Figuras 5-1 y 5-2).

La Caliza Quebradillas (Camuy) parece ser mas variada que en los tramos anteriores. De acuerdo al USGS, consiste de capas finas a gruesas de caliza ferruginosa (mayormente calcarenita), greda limosa y caliza gredosa y terrosa. La Caliza Aymamón consiste de capas gruesas a masivas de greda fina cristalina, caliza relativamente pura (mayormente calcarenita) y brechas de caliza re-cementada. En adición, en cortes excavados para un desarrollo de viviendas a la altura de la Estación 134 se puede apreciar unos estratos calizos relativamente ricos en limo y arcilla de origen terrígeno.

Como sucede a través del Karso, la caliza expuesta en afloramientos naturales usualmente exhibe recristalización lo que le imparte una resistencia mayor a la del material intacto. En adición, mucha de la caliza expuesta contiene cavidades producto de disolución, la mayoría de las cuales son pequeñas. Durante el recorrido de campo se observaron varias cavidades y lechos rocosos en que cabe un ser humano, pero ninguno de estos es un rasgo notable. La cavidad mas notable observada en este tramo es un sumidero en roca que ocurre como a 200 metros al sur de la alineación (Estación 143+50) y al este de la Carretera PR-482 (Figura 6-5).

Los Depósitos de Manto (*Qbs* y *QTbs* en la Figuras 5-1 y 5-2) consisten primordialmente de limo y arcilla con granos finos de arena de cuarzo como un componente secundario. Por lo general la arcilla es de consistencia firme a dura y típicamente exhibe un grado limitado a moderado de plasticidad. En algunas localidades el suelo superficial es arenoso pero esto parece ser mayormente producto de erosión selectiva del material fino (limo y arcilla) quedando atrás un residuo de arena suelta sobre el suelo arcilloso. Se pudo ver el contacto con la caliza subyacente en varias excavaciones en el tramo; el contacto tiende a ser sumamente irregular y la caliza

subyacente exhibe los efectos de la karstificación: disolución y recristalización; también se observan bloques de caliza rodeados por suelo. El aspecto más sobresaliente del afloramiento de los Depósitos de Manto es la cantidad de sumideros que ocurren en estos suelos, incluyendo varios a lo largo del centro de la alineación (ver Figuras 6-4 y 6-5). Algunas de las depresiones tienen caliza karstificada por disolución en el piso, usualmente cerca de la parte mas profunda, pero la mayoría consisten completamente de suelo.

Finalmente, en la falda de muchos de los mogotes se observa el material coluvial típico de las calizas.

D. Estación 190+00 a 244+00 (Quebradillas a Isabela)

El tramo entre las estaciones 190+00 a 244+00 tiene la topografía más accidentada de todo el Corredor (Figura 1-3). De acuerdo al USGS, esta topografía se formó sobre la Caliza Aymamón, la única de las formaciones del Terciario medio a superior que aflora en la sección (*Tay* en la Figura 5-3). En muchos lugares la caliza está cubierta por un fino manto de suelo residual y vegetación en varios grados de descomposición. También hay extensos depósitos coluviales, particularmente a lo largo del cañón del Río Guajataca. Finalmente, el USGS describe un tramo en que la Caliza Aymamón está sepultada bajo Depósitos de Manto (*QTbs*).

Entre aproximadamente las Estaciones 190+00 y 210+00 el Corredor atraviesa una zona de cerros calizos de pendientes moderadas a fuertes y en algunos lugares verticales. La alineación cruza el Río entre las Estaciones 210+00 y 216+00. Este tramo tiene la topografía más escabrosa del Corredor con el Guajataca encausado en un profundo cañón cuyas paredes de Caliza Aymamón alcanzan más de 170 metros (560 pies) sobre el lecho del río. Al oeste del cañón, y en contraste a la topografía accidentada del lado este del río, la alineación cruza una suave llanura con Depósitos de Manto que se extiende hasta llegar al margen de la cuenca hidrográfica de la Quebrada La Sequia cerca de la Estación 224+00. La Quebrada La Sequia es una quebrada intermitente tributaria al Río Guajataca (al cual se une unos 3 kilómetros al noreste de donde se cruza con el

Corredor); su cuenca consiste de un conjunto de colinas y cerros en Caliza Aymamón de pendientes moderadas a fuertes y relieve del orden de 20 a 60 metros. La alineación cruza la cuenca con rumbo oeste-noroeste, pasando la quebrada intermitente cerca de la Estación 235+00.

Al igual que en el tramo anterior, la Caliza Aymamón consiste de capas gruesas a masivas de greda fina cristalina, caliza relativamente pura (mayormente calcarenita y calcirudita) y brechas de caliza re-cementada. Muchos de los estratos son ricos en fósiles de invertebrados marinos. En términos de sus propiedades físicas, los estratos calizos son materiales competentes cuyo comportamiento ingenieril corresponde a materiales rocosos. Los Depósitos de Manto en este tramo consisten de arcilla firme y moderadamente plástica, también con arena fina de cuarzo como un componente secundario.

La roca del tramo está intensamente karstificada. La mayoría de los afloramientos consisten de material recristalizado, y en muchos lugares se observa precipitados de carbonato de calcio ("flowstone"), en sitios formando estalactitas y estalagmitas. Las cavidades por disolución son comunes, pero no se observaron muchas cavidades grandes (cuevas). Hay dos áreas en que se vieron cuevas (Figura 6-6): una se encuentra al este del Río Guajataca, al sur de la Estación 198+00 e incluye una apertura que alcanza hasta unos 11 metros (35 pies) de profundidad y 2 metros (6 pies) de altura; la otra incluye varias aperturas grandes visibles en el acantilado oeste del Guajataca, cerca de la cresta. Estas últimas no son accesibles excepto usando técnicas del alpinismo. Las dos zonas de cuevas exhiben control estructural en el sentido que las aperturas ocurren a lo largo de contactos entre estratos calizos, y en ambas se observan prominentes refugios rocosos producto de un proceso de erosión más rápida del estrato inferior. En varios otros sitios también se observaron refugios rocosos relativamente grandes, con techos en voladizo de hasta mas de 4.5 metros (15 pies).

El segundo material geológico en abundancia en este tramo consiste de coluvión (recordamos que éste no se identifica en los mapas del USGS). Este ocurre en la falda de los cerros calizos a través del tramo y al pie del cañón del Guajataca, y en el mismo río.

Se estima que el espesor del coluvión en los márgenes del Río Guajataca alcanza al menos 20 metros a lo largo de gran parte del cauce y posiblemente hasta 50 metros en algunos sitios. Incluye bloques de roca caliza de mas de 10 metros (35 pies) de ancho que cayeron de las paredes del acantilado (en las fotos aéreas se identificaron varios escarpes producidos por desprendimientos; estos se ilustran en la Figura 6-6). La composición del material coluvial es similar a la descrita anteriormente: mezclas variables de piedra caliza y suelo terrígeno-calcáreo, localmente con restos de vegetación.

Se observaron varias pequeñas depresiones en la roca caliza, pero la mayor parte del área tiene declives conducentes a un drenaje superficial hacia el Río Guajataca. En los cerros que están al este del Río hay una serie de cañadas cortas que bajan por las paredes del cañón, mientras que en el lado oeste está la Quebrada La Sequia con un sistema integrado de hondonadas tributarias. Aunque no hay duda que la infiltración a la roca caliza es significativa, una parte de la escorrentía del área drena superficialmente al Río Guajataca. Sólo en una parte del afloramiento de los Depósitos de Manto al oeste del cañón del Guajataca (aproximadamente entre las estaciones 216+00 y 220+00) donde hay varios sumideros es que el drenaje es mayormente interno.

E. Estación 244+00 a 386+00 (Isabela, Moca y Aguadilla)

Al salir de la cuenca de la Quebrada La Sequia el Corredor entra a otra llanura levemente ondulada (Figuras 1-3 y 1-4) llena de Depósitos de Manto (*QTbs* en las Figuras 5-3 y 5-4) con numerosos sumideros (Figuras 6-7, 6-8 y 6-9) y algunos mogotes de Caliza Aymamón (*Tay* y *Taz*). El Corredor discurre por el llano, pasando varios mogotes aislados hasta llegar a una hilera de mogotes de Caliza Aymamón que bordea el lado sur del llano (cerca de la Estación 270+00). Esta línea de mogotes se extiende hacia el oeste-suroeste y al sur hay otro llano de Depósitos de Manto que se caracteriza por la presencia de sumideros considerablemente mas grandes que los que típicamente sen ven en estos llanos (muchos cubren mas de 10 cuerdas y alcanzan profundidades en exceso de 15 metros). El centro de la alineación sigue la hilera de mogotes hasta que cerca de la Estación 301+00 entra a la llanura que está al sur. Continúa por éstos Depósitos de Manto

curveando hacia el norte hasta que vuelve a cruzar la hilera de mogotes a la altura de la Estación 318+00 y regresa a la llanura original al norte de la hilera. La alineación entonces continúa en los Depósitos de Manto bordeando el lado norte de la hilera de mogotes hasta la intersección con la PR-462 cerca de la Estación 364+00. El cuadrángulo geológico no enseña los Depósitos de Manto en esta parte del tramo (aproximadamente entre las Estaciones 328+00 y 364+00) ni al oeste de la PR-462 (Figura 5-4) sino que representa los materiales en estas secciones como Caliza Aymamón. Sin embargo, aunque la Caliza Aymamón se observa en los mogotes y lomas calizas que hay por el llano, y en las partes profundas de algunos de los sumideros, el material que aflora a través de la mayor parte de la llanura es suelo de los Depósitos de Manto, y a base de barrenos hechos en el área para proyectos privados se sabe que estos suelos sobrepasan 10 metros (35 pies) de espesor en algunos sitios.

Llegando a la Carretera PR-462 la hilera de mogotes se une a la Cordillera Jaicoa, una cadena escabrosa de cerros calizos que se extiende como un paisaje lunar hacia el sur, sureste y suroeste. El Corredor se mantiene al norte de la Cordillera, continuando por un llano ondulado lleno de sumideros en los Depósitos de Manto hasta llegar al margen de la Cordillera cerca de la Estación 386+00.

El USGS divide la Caliza Aymamón de este tramo en 2 miembros que denomina miembros inferior (*Tay* en la Figuras 5-3 y 5-4) y superior (*Taz*). El tramo discurre por el miembro superior hasta cerca de la Estación 300+00 continuando entonces por una sección en que afloran ambos miembros (el superior sobre el inferior) de la Estación 300+00 a la 319+00, y por el miembro inferior entre las Estaciones 319+00 y 386+00. Entre las Estaciones 294+00 y 301+00 hay dos canteras grandes en cuyas paredes está expuesta la secuencia de estratos que compone la Caliza Aymamón en esta área.

De acuerdo al USGS, el miembro inferior de la Caliza Aymamón consiste de estratos gruesos a masivos de caliza fosilífera (calcarenita y calcirudita) de alta pureza, frecuentemente endurecida a una caliza densa y cristalina, localmente una brecha de caliza re-cementada con algunas capas finas de caliza granular (calcarenita) y greda. El miembro superior es dominado por capas gruesas a masivas de greda y caliza dura

(calcarenita y calcilutita), y aunque localmente abundan, tiende a tener menos fósiles que los estratos del miembro inferior. Todas las calizas presentes en estas secuencias son materiales competentes capaces de brindar sostén adecuado para estructuras convencionales. El cuadrángulo geológico también muestra afloramientos de la Caliza Quebradillas (Camuy) en la cresta de varios mogotes entre las Estaciones 260+00 (al sur de la línea de centro) y 286+00. Estos no fueron vistos pero de acuerdo al USGS, esta unidad consiste de capas finas a masivas de greda y calcarenita ferruginosas.

Los Depósitos de Manto son similares a los observados a través de la alineación. Consisten de mezclas de arcilla, limo y arena fina (predominantemente cuarzo). Son de consistencia firme a dura y exhiben plasticidad débil a moderada. También hay depósitos coluviales en la falda de los mogotes, e igualmente son similares a los de las secciones anteriores; su espesor probablemente no excede unos 2 a 3 metros.

Los estratos de la Caliza Aymamón exhiben un alto nivel de karsificación. Las calizas están extensamente recristalizadas y contienen numerosas cavidades. En una de las canteras se observan estratos con tantas aperturas (mayormente menores de 0.3 metros en diámetro) que la caliza parece un queso suizo. Lo mismo se puede decir de la superficie de las llanuras de los Depósitos de Manto, aunque a una escala mayor. Las llanuras consisten de decenas y decenas de sumideros (muchos de los cuales ocurren a lo largo o cerca del centro de la alineación; ver Figuras 6-8 y 6-9) que recogen la escorrentía que se genera en la zona. Muchos sumideros tienen roca caliza con cavidades abiertas en sus partes bajas. En otros se observan aperturas rellenas con suelo de los Depósitos de Manto, condición probablemente común en el subsuelo a través de los llanos. Algo similar se observó en una de las canteras donde en una de las paredes ocurre una cavidad vertical relativamente grande que cruza varios estratos y que fue rellenada de limo y arcilla terrígena de color rojizo, presumiblemente por agua subterránea que percola por la roca. También se observó un gran número de lechos rocosos y cuevas pequeñas, particularmente en la caliza expuesta en la falda de mogotes donde colindan con sumideros, y en las paredes de éstos frecuentemente ocurren precipitados de carbonato de calcio.

F. Estación 386+00 a 440+00 (Aguadilla)

Cruzando la PR-443 (Estación 386+00) el Corredor comienza a bordear el margen norte de la Cordillera Jaicoa, cruzando varios cerros del miembro inferior de la Caliza Aymamón (Figura 5-5); en las llanadas entre los cerros la caliza esta cubierta por suelos arcillosos típicos de los Depósitos de Manto. Cerca de la Estación 404+00 la alineación toma un giro hacia el sur y se adentra en la Cordillera encontrando por primera vez los estratos de la Caliza Aguada (Los Puertos). La topografía de la Cordillera se caracteriza por una densa concentración de mogotes y sierras de Caliza Aguada (Los Puertos) de gran altura con pendientes moderadas a fuertes separados por sumideros profundos. Entre las Estaciones 418+00 y 430+00 la cresta de los cerros consiste de Caliza Aymamón y al este de este tramo, varios de los llanos entre los cerros tienen Depósitos de Manto. El afloramiento de la Caliza Aguada continúa hasta Los Cerros Viñet cerca de la Estación 440+00, pero entre las Estaciones 435+00 y 436+00 (aproximado), la alineación cruza una hondonada en que aflora la Formación Cibao que ocurre debajo de la Caliza Aguada (Los Puertos). La mayoría de los sumideros en el margen de la Cordillera por donde cruza el Corredor tienen brechas que permiten que la escorrentía drene superficialmente hacia la Bahía de Aguadilla (Figuras 1-5, 6-9 y 6-10). No obstante las calizas de este tramo tienen una alta porosidad producto de disolución que permite una alta infiltración de agua al subsuelo de manera que gran parte del drenaje de este tramo del corredor es subterráneo.

El USGS describe la Formación Cibao en el área de Aguadilla como intercalaciones de arcilla calcárea, greda terrosa de carácter blando y calcarenita dura de grano fino y caliza blanda no-granular, comúnmente fosilíferas. La Caliza Aguada (Los Puertos) se describe como estratos gruesos de calcarenita dura que alterna con caliza gredosa (calcilutita) y caliza pedregosa; la parte superior de la formación, debajo del contacto con la Caliza Aymamón, consiste de capas finas de calcarenita. También se observaron brechas calcáreas en varios afloramientos de esta formación. El miembro inferior de la Caliza Aymamón se describe como caliza fosilífera (calcarenita) de alta

pureza, generalmente endurecida a una caliza densa y cristalina, localmente una brecha de caliza re-cementada.

Las rocas observadas exhiben todos los rasgos asociados a una karstificación intensa, incluyendo recristalización, precipitados de carbonato de calcio y cavidades de disolución. Estas últimas incluyen un número de sumideros en roca caliza (o sea, que carecen suelo de los Depósitos de Manto) y pequeñas cuevas pequeñas dispersas a través del área. Muchas de estas últimas ocurren en grupos que definen un nivel de elevación, frecuentemente en coincidencia con un contacto entre estratos calizos[15]. Las cavidades más significativas observadas se identifican en las Figuras 6-9 y 6-10, junto a los sumideros encontrados. Estas incluyen sumideros que conectan con cuevas en la vecindad de las Estaciones 407 y 414.

En adición a los Depósitos de Manto que ocurren en el afloramiento de la Caliza Aymamón, los suelos superficiales observados incluyen material coluvial en las laderas inferiores de los cerros y un suelo arcilloso de alta plasticidad observado en la vecindad de la Estación 438+00, la extensión del cual se desconoce (este podría ser parte de la Formación Cibao). El material coluvial incluye bloques de caliza de hasta 6 metros de diámetro.

El cuadrángulo geológico muestra cuatro fallas geológicas en el área de este tramo y el tramo siguiente (Figuras 5-5, 6-9 y 6-10). Tres de las fallas intersecan el Corredor aproximadamente entre las Estaciones 410+00 y 417+00; la cuarta se mantiene al oeste de la alineación. De acuerdo al USGS las fallas muestran desplazamientos verticales en que los bloques que están del lado este de las fallas han caído (hasta 30 metros) con relación al lado opuesto. En el campo no se observó evidencia de las 3 fallas que cruzan el Corredor, inclusive hay un corte reciente en la traza de la falla central en el

[15] Se ha descrito como la disolución de la roca caliza ocurre de forma preferencial en estratos de mayor pureza y/o mayor permeabilidad, siendo esto una de las causas de que frecuentemente se observen concentraciones de cavernas en ciertos horizontes de la secuencia caliza. En adición, en cualquier momento dado la disolución de la caliza se concentra en la zona de fluctuación en el nivel del manto freático donde se recarga el agua subterránea y donde el agua es mas agresiva en término de su capacidad de disolución. Esto produce concentraciones de cuevas a ciertas elevaciones, que debido al declive leve que caracteriza las formaciones calizas, frecuentemente coincide con los contactos entre estratos calizos.

que los estratos no se ven desplazados. Sin embargo, unos 30 metros al oeste del corte hay otro corte en que aflora roca que parece estar altamente fracturada que podría representar una zona de falla. También se observó una pequeña falla en un corte localizado unos 100 metros al este de la traza de la cuarta falla identificada por el USGS, esta se encuentra fuera del Corredor.

G. Estación 440+00 a 446+00 (Aguadilla)

Este tramo comienza en Los Cerros Viñet y termina en la Carretera PR-111. Los Cerros Viñet son parte de un imponente escarpe de cuesta (Escarpe de Lares) que se extiende de forma mas o menos continua entre Aguadilla y la Zona Metropolitana de San Juan y que marca el límite sur de la Cordillera Jaicoa y de la propia Zona Cársica. La Carretera PR-111 se extiende de este a oeste por la zona de contacto del pié del Escarpe y el valle aluvial del Río Culebrinas. La topografía de este tramo es inicialmente empinada pero luego se torna mas llevadera y aunque continúa en descenso, la superficie es algo irregular e incluye varias depresiones que drenan internamente (Figura 6-10). Estas depresiones difieren de las presentes a lo largo del resto del Corredor en que no fueron creadas por disolución de roca caliza sino que se formaron debido a movimientos diferenciales del terreno asociados a deslizamientos[16]. Aparte de estas depresiones, el drenaje de la bajada es mayormente superficial hacia el valle del Río Culebrinas, y hay varias hondonadas pequeñas que encausan la escorrentía durante eventos de lluvia.

De acuerdo al USGS este tramo discurre a través de la Formación Cibao (*Tc* en la Figura 5-5) y Depósitos de Deslizamiento (*Ql*). El cuadrángulo geológico también muestra un pequeño afloramiento de la Formación San Sebastián (*Ts*) junto a la traza de una falla geológica (una de las 3 que cruza la alineación en el tramo anterior) unos 200 metros al este del centro del Corredor (Estación 446+00). La Cibao se describe según ya se ha indicado: intercalaciones de arcilla calcárea, greda terrosa de carácter blando y calcarenita dura de grano fino y caliza blanda no-granular, comúnmente fosilíferas. En

[16] En la literatura geológica/geotécnica estas depresiones se conocen como charcas de hundimiento ("sag ponds") debido a que acumulan agua de escorrentía y frecuentemente forman pequeñas charcas o humedales.

cortes al oeste del Corredor también aflora un estrato de grava fina arenosa. La Formación San Sebastián consiste de lentes de arena, grava y arcilla. Los Depósitos de Deslizamiento se describen como bloques de caliza y arcilla arenosa de hasta 50 metros de largo en una matriz de arcilla arenosa.

La geología de este tramo podría ser más compleja de lo que indica el cuadrángulo geológico dado que la topografía del terreno exhibe características de paisajes creados por grandes y/o frecuentes deslizamientos[17]. Estas incluyen el acantilado que forma la cara sur de Los Cerros Viñet y la irregularidad de la superficie que está por debajo de éste, incluyendo la presencia de charcas de hundimiento (ver nota al pie Num. 16). De ser así, lo que se identifica como Formación Cibao y San Sebastián representan bloques de estos materiales que se han desplazado de su localización original. Los materiales vistos a lo largo del Corredor dentro de lo que el USGS designa como Cibao consisten mayormente de mezclas de suelo terrígeno y calcáreo con fragmentos de roca caliza en algunos sitios. También es posible que en el terreno deslizado haya bloques de Caliza Aguada provenientes de la cresta de los Cerros Viñet.

Los deslizamientos y derrumbes que produjeron la topografía de deslizamiento que caracteriza la zona incluyeron movimientos de gran magnitud, algunos de los cuales probablemente movilizaron decenas de miles de metros cúbicos de suelo y roca en un momento dado. No se observó evidencia de movimiento reciente a esta escala, pero sí hay indicios de inestabilidad en el área (Figura 6-10). Por ejemplo, al oeste de las Estaciones 444+00 y 445+50 (aproximadamente) se observan los restos de un derrumbe que ocurrió en el material ya deslizado (Figura 6-10), y en la vecindad de la Estación 442+00 se observaron varias fisuras abiertas que indican movimiento ocurrido hace no más de un año; una de estas fisuras tiene más de 9 metros (30 pies) de largo y muestra desplazamiento vertical de unos 0.6 metros (2 pies).

[17] Esta topografía se aprecia a lo largo de gran parte del Escarpe de Lares desde Aguadilla a Toa Alta, y en años recientes este paisaje ha sido el escenario de deslizamientos grandes en los Municipios de Ciales, Utuado, Lares y San Sebastián).

Al oeste de la Estación 443+00, fuera de la franja de estudio, se encontró una pequeña falla y un sumidero-cueva relativamente grande cerca del margen del acantilado (ver Figura 6-10).

H. Estación 446+00 a 462+46.50 (Aguadilla)

El último tramo comprende una amplia curva que se abre primero hacia el este cruzando el Caño Madre Vieja para luego dirigirse en dirección contraria terminando en la Carretera PR-2 en la llanura de inundación del Río Culebrinas (Figura 1-5). El terreno a lo largo de la ruta es llano y de acuerdo al USGS consiste de suelos aluviales compuestos por arcilla arenosa y arena arcillosa de hasta 10 metros de espesor (Figura 5-5).

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta sección presenta un resumen de la geología a lo largo de la Alterna Campo Traviesa y discute los posibles impactos que ésta pudiera tener sobre la propuesta ruta. Las conclusiones y recomendaciones que se presentan tienen el propósito de describir las características generales del área para propósitos de la DIA-P. Pueden ser usadas para guiar la planificación y el diseño preliminar de la alineación. Sin embargo, será necesario realizar estudios mas específicos para obtener los parámetros geotécnicos requeridos para finalizar el diseño del proyecto y para atender las limitaciones que se señalan en este informe.

A. Geología

Los rasgos generales de la geología del área por la cual discurre la ruta se describen en cuatro mapas geológicos a escala de 1:20,000 publicados por el USGS (Apéndice A). Esta información sirvió de base para la evaluación geológica que se reporta en este informe, suplementada por observaciones hechas durante un recorrido de la ruta. Las Figuras 3 y 5 muestran la distribución de las distintas unidades geológicas en que el USGS ha dividido los materiales terrestres presentes a lo largo de la ruta. Durante el recorrido de campo se encontraron varios lugares donde la geología no corresponde a

lo que presentan los cuadrángulos, la diferencia mas común siendo la posición de los contactos entre unidades y, en un segundo lugar, el tipo de material presente en un lugar dado. Estas diferencias, que generalmente son menores, se consideran irrelevantes para los propósitos de este estudio, que es evaluar la geología de la ruta como parte de la evaluación ambiental del proyecto. De proseguir este proyecto a la etapa de diseño, los estudios detallados necesarios para diseñar el Corredor habrán de considerar las variaciones.

Los materiales terrestres presentes a lo largo del Corredor consisten de una secuencia de estratos dominados por roca caliza del Terciario medio a superior y una variedad de sedimento no-consolidado del Cuaternario que localmente cubre el basamento calizo (Figuras 3 y 5). Con la excepción de 4 fallas pequeñas que el USGS ubica en la vecindad de Aguadilla, los estratos calizos no muestran deformación de naturaleza tectónica. Los estratos se inclinan levemente hacia el norte por lo que las distintas unidades o formaciones afloran como franjas que se extienden de este a oeste (Figuras 3 y 4). Este patrón de afloramiento coincide con la alineación de la propuesta ruta de manera que entre Arecibo y Aguadilla la ruta se mantiene dentro del afloramiento de la Caliza Quebradillas (Camuy) y la Caliza Aymamón; no es hasta llegando al final del proyecto en Aguadilla que la alineación gira hacia el sur entrando al afloramiento de la Caliza Aguada (Los Puertos) seguido por la Formación Cibao.

Los estratos que componen las formaciones calizas son materiales competentes generalmente adecuados para una gama de usos en ingeniería. Por ejemplo, usualmente son excelentes como materiales de construcción (rellenos, agregados), y son relativamente estables en cortes y proveen capacidad de sustentación adecuada para una variedad de estructuras. De hecho, en su forma cristalina (ya sea primaria o por recristalización) exhiben parámetros de resistencia típicamente asociados con rocas ígneas y metamórficas de mayor densidad. Sin embargo, las calizas son susceptibles a disolución por agua de lluvia, proceso que produce la topografía kárstica que caracteriza la ruta del Corredor. Una de las características distintivas del karso es la presencia de cavidades que van desde pequeñas aperturas del tamaño de un grano de arena a cavernas

inmensas como las que hay en el Parque de las Cavernas del Río Camuy, y la presencia de cavidades en el subsuelo puede ser determinante en el comportamiento de la fundación de una estructura. Los estratos calizos observados a lo largo del Corredor exhiben numerosas cavidades de disolución, algunas de hasta unos 10 metros de diámetro. El tema de las cuevas se discute en una próxima sección.

Los suelos superficiales (del Cuaternario) incluyen Depósitos de Manto, coluvión (que no se identifica en los cuadrángulos geológicos), Depósitos de Deslizamiento en el Escarpe de Lares y suelo aluvial. Los Depósitos de Manto son el material no-consolidado más abundante a lo largo de la ruta. Consisten de suelos residuales que típicamente se describen como arcilla, arcilla limosa o limo arcilloso. Su consistencia usualmente es firme a dura y exhiben plasticidad baja a moderada. No se consideran suelos problemáticos, pero frecuentemente están asociados con sumideros de colapso, otro tema discutido en la próxima sección.

Los suelos coluviales abundan en los tramos en que el corredor discurre a través de las zonas de cerros calizos que bordean los Ríos Camuy y Guajataca y la Quebrada La Sequia, y en la Cordillera Jaicoa. También ocurren en los márgenes de mogotes donde probablemente se entrelazan con los Depósitos de Manto. Consisten de mezclas heterogéneas de fragmentos de roca caliza y suelo terrígeno y calcáreo que se acumuló al pie de los taludes calizos en un estado relativamente suelto y con inclinaciones cerca de lo que es el ángulo de reposo de la aglomeración. Considerando su origen y composición, los materiales coluviales pueden presentar condiciones difíciles para la fundación de una estructura y son inherentemente inestables por lo que la construcción en ellos requiere conocimiento adecuado de su distribución y características ingenieriles. Esta información será provista por los estudios geotécnicos necesarios para finalizar el diseño del proyecto.

La alineación cruza el Escarpe de Lares entre las Estaciones 440+00 a 446+00. El Escarpe es una zona afectada por grandes deslizamientos. En términos generales la geología del Escarpe consiste de una capa de material competente formado por la Caliza Aguada (Los Puertos) sobre material más débil (Formación Cibao). Muchos textos de geología introductoria describen esta combinación como uno de los ambientes geológicos

más propensos a inestabilidad: el material débil se meteoriza y erosiona mas rápidamente que la capa superior de manera que ésta se va socavando hasta que cede y se desliza o cae cuesta abajo. El USGS describe los materiales expuestos a lo largo del Escarpe como Depósitos de Deslizamiento y Formación Cibao (Figura 5-5) pero las observaciones hechas durante este estudio sugieren que lo que está descrito como Cibao probablemente representa material deslizado. En términos de su composición, los Depósitos de Deslizamiento consisten de arcilla y limo calcáreo/terrígeno y bloques de Caliza Aguada y Formación Cibao.

Los suelos aluviales ocurren en dos tramos de la ruta. El primero ocurre en el valle del Río Camuy y se extiende desde su cauce hasta cerca de las paredes del valle. Consiste de arcilla, limo y arena mayormente fina. El espesor del aluvión alcanza al menos 3 metros en las riberas del río, y podría ser considerablemente mayor dependiendo de la profundidad a la cual el río ha cavado el valle. En contraste, el cauce del Río Guajataca generalmente carece de material aluvial[18], posiblemente como consecuencia de la Represa Guajataca que atrapa la mayor parte del sedimento que se genera en los afloramientos de material terrígeno de la cuenca. Los suelos aluviales más extensos ocurren en el tramo final de la alineación en el Valle del Río Culebrinas. Estos consisten de mezclas de arena y arcilla y pueden alcanzar hasta 10 metros de espesor.

Finalmente, se observaron 2 otros tipos de suelo. El primero es un suelo residual que cubre mucha de la caliza en los mogotes y cerros de la ruta. Consiste mayormente de mezclas de arena y limo terrígeno y restos vegetales y usualmente no excede un espesor de un metro. Estos materiales generalmente son inconsecuentes para propósitos de ingeniería. El segundo suelo es una arcilla que aflora en la vecindad de la Estación 438+00, la cual podría ser un estrato de lutita (Formación Cibao?) altamente meteorizado. El suelo exhibe grietas de secamiento de hasta unos 5 centímetros (2 pulgadas) de ancho, lo que indica que el material tiene potencial alto de expansión[19].

[18] En el cause del Río Guajataca lo que hay es una abundancia de fragmentos de roca caliza proveniente de las paredes del acantilado (coluvión).

[19] Los suelos expansivos son suelos arcillosos cuyo volumen cambia con variaciones en su contenido de humedad, expandiendo al mojarse y encogiéndose al secarse.

B. Hidrogeología

Una de las características de las regiones kársticas es que drenan internamente y ese ciertamente es el caso de la mayor parte del terreno en la ruta de la Alterna Campo Traviesa. Las calizas que subyacen el área generalmente tienen buena permeabilidad secundaria producto de disolución que permite la infiltración de escorrentía y su migración subterránea hacia el manto freático para nutrir el acuífero calizo del área. Este acuífero es parte del Sistema de Acuífero de la Costa Norte de Puerto Rico (Rentgen y otros, 2002) que es la fuente principal de agua para muchos de los municipios del norte de Puerto Rico, particularmente entre Arecibo y la Zona Metropolitana de San Juan[20]. El USGS divide el Sistema en 3 componentes principales: un acuífero freático superior en las Calizas Aguada (Los Puertos) y Aymamón, una unidad intermedia de permeabilidad reducida en la que el flujo de agua subterránea es reducido (mayormente en el miembro Cibao no-diferenciado de la Formación Cibao) y un acuífero artesiano[21] profundo en la Caliza Lares y la Caliza Montebello de la Formación Cibao. Ambos acuíferos se recargan en las áreas donde las formaciones que los componen afloran en la superficie; la unidad intermedia de baja permeabilidad separa los acuíferos e inhibe el intercambio de agua entre ellos. De acuerdo al USGS, el acuífero freático descansa sobre un lente de agua salada cerca de la costa norte de la isla.

El acuífero principal en el área de la Alterna Campo Traviesa es el acuífero freático. La Figura 8 tomada de Renken y otros (2002) muestra la elevación del nivel potenciométrico (para efectos prácticos equivalente al nivel freático) relativo al nivel del mar en el acuífero. Se puede notar que a lo largo de la mayor parte de la Alterna Campo

[20] Dos factores han retrasado el desarrollo del acuífero calizo al oeste de Arecibo. El primero es la profundidad (ver texto) a que ocurre el agua, lo que incrementa el costo de la extracción. Segundo, el area se nutre del Embalse Guajataca cuya agua es transportada por un sistema de canales originalmente concebido para propósitos de irrigación.

[21] El USGS define un acuífero como "cualquier formación geológica que contenga o pueda contener agua y que rinda suficiende caudal a un pozo hincado dentro de éste" (Quñones y Alicea-Ortiz, 1985). En un acuífero freático el agua se encuentra bajo condiciones hidrostáticas y es necesario elevar el agua a la superficie por medio de una bomba. En un acuífero artesiano el agua se encuentra a una presión mayor a la presión hidrostática y sube sobre el nivel del acuífero por si sola al ser penetrada por un pozo, en algunos casos llegando hasta la superficie terrestre.

Traviesa éste se encuentra cercano al nivel del mar. Considerando la elevación del terreno a lo largo de la ruta, el nivel freático se encuentra a profundidades que típicamente exceden 60 metros (200 pies), excepto en los valles de los Ríos Camuy, Guajataca y Culebrinas, los cuales intersecan y se nutren del nivel freático, y en la parte baja del Escarpe de Lares. Cabe notar que el lecho de la Quebrada La Sequia donde cruza la alineación se encuentra a más de 90 metros (330 pies) sobre el nivel del mar; esta quebrada pierde agua al subsuelo por lo que sólo tiene agua durante periodos de lluvia.

Los contornos de nivel potenciométrico (Figura 8) indican que el flujo regional del agua subterránea es hacia las costas y los ríos. Sin embargo, la trayectoria que toma el agua desde que se infiltra en la superficie hasta que llega al manto freático se desconoce. En un material permeable de porosidad homogénea, como un depósito de arena o grava, el movimiento del agua que se infiltra por los vanos presentes entre los granos que componen el material es esencialmente vertical y hacia abajo (hacia el manto freático) con un componente menor de dispersión lateral. En muchas de las calizas, sin embargo, este flujo disperso es insignificante en comparación con el flujo que ocurre vía orificios creados por disolución de la caliza. La infiltración entonces está regida por la orientación de los sistemas de cavidades subterráneas y podría ser sumamente tortuosa, condición que generalmente aplica a todo el movimiento de agua subterránea en las regiones kársicas, siendo la ocurrencia de ríos subterráneos una manifestación de esta tendencia. También es probable que en algunas localidades haya horizontes de menor permeabilidad sobre los cuales se empoza el agua que se infiltra formando niveles de agua colgante ("perched groundwater") que retrasan la migración al manto freático.

El drenaje en los tramos entre las Estaciones 80+00 a 190+00 y 244+00 a 386+00 es subterráneo vía sumideros tan numerosos que la superficie del terreno parece la de una colmena; no hay nada que siquiera se asemeje a una quebrada o riachuelo. La precipitación que cae en el área se evapora o se infiltra al subsuelo donde es utilizada por las plantas o se integra al sistema de drenaje subterráneo. Los tramos entre las Estaciones 0+00 a 45+00 y 386+00 a 440+00 tienen partes que drenan superficialmente por medio de quebradas intermitentes y otras con drenaje subterráneo, y en ambos tramos la línea de

centro de la alineación se encuentra cerca de la divisoria entre los dos tipos de drenaje. Entre las Estaciones 0+00 a 45+00 el drenaje superficial ocurre al norte de la línea de centro y es hacia el Océano Atlántico; al sur, el drenaje está dominado por sumideros. Igualmente, al oeste del centro de la alineación entre las Estaciones 386+00 a 440+00 hay un sistema de quebradas intermitentes que drena hacia la Bahía de Aguadilla mientras que al este, el drenaje es interno por medio de sumideros y cavidades presentes en las hondonadas entre los cerros calizos. Esto último se aprecia dramáticamente entre las estaciones 400+00 y 430+00 donde varios valles cruzan la alineación con declives hacia la Bahía de Aguadilla. Vistos de lejos estos parecen drenar en esa dirección pero al caminar el área uno encuentra numerosos orificios en la caliza que aflora en el piso de los valles, incluyendo varios sumideros, que interceptan la escorrentía y la conducen al subsuelo.

Los tramos entre las Estaciones 45+00 a 80+00, 190+00 a 244+00 y 440+00 a 462+46.50 cruzan terreno con sistemas de quebradas integrados que drenan hacia los Ríos Camuy, Guajataca y Culebrinas, respectivamente. Sin embargo, con la excepción del último tramo (Estación 440+00 a 462+46.50) que discurre por terreno formado por sedimentos de alto contenido de material terrígeno, las calizas presentes en los primeros dos tramos poseen un alto grado de permeabilidad por disolución y drenaban subterráneamente en el pasado, y es probable que una parte significativa de la escorrentía de hoy día continúa usando el sistema subterráneo. En varios sitios se aprecian vestigios del antiguo sistema de drenaje interno. Por ejemplo, la zona deprimida que hay entre las colinas al este del Río Camuy, al sur del tramo entre las Estaciones 57+00 a 65+00 (aproximadamente), parece ser el remanente de un antiguo sumidero de gran extensión cuyas paredes, representadas por las colinas que lo bordean, han sido brechadas. Rasgos similares a éste se ven en la vecindad del Río Guajataca y en la cuenca de la Quebrada La Sequia.

C. Limitaciones

Un análisis de la geología de la propuesta ruta a campo traviesa revela que no hay ningún factor de naturaleza geológica o geotécnica que impida la construcción del proyecto. Es cierto que varios aspectos de la geología presentan limitaciones a la construcción de una autopista o cualquier otro proyecto de envergadura, pero estas se pueden atender con medidas de ingeniería que eliminan o disminuyen los problemas. Es importante recordar que el karso se extiende desde Aguadilla a San Juan y que dentro de esta zona hay áreas extensamente desarrolladas, desarrollo que incluye varias carreteras nuevas construidas en los últimos 30 años. La mayoría de los problemas potenciales identificados a lo largo de la ruta ya han sido confrontados en otros proyectos. Aquellas obras que se diseñaron y construyeron haciendo uso de información actualizada y detallada sobre la geología y aspectos geotécnicos de las localidades desarrolladas generalmente han estado libres de problemas geológicos y geotécnicos. Hay soluciones conocidas para atender las limitaciones encontradas y por lo general no es necesario "reinventar la rueda". No obstante, en aquellos casos que se requieran soluciones innovadoras, en la isla existe la capacidad profesional para desarrollarlas.

Las limitaciones se pueden dividir en 2 grupos: unas que son peculiares al karso y otras que pueden ocurrir en cualquier ambiente geológico. Estas últimas incluyen aquellas limitaciones que tienen que ver con las propiedades geotécnicas de los materiales terrestres; de estas se ha mencionado la presencia de suelos expansivos y la capacidad de sustentamiento ("bearing capacity") de los suelos y rocas presentes en el Corredor. Estos se atienden mediante estudios geotécnicos detallados necesarios para diseñar el proyecto. Otras limitaciones de este grupo incluyen la estabilidad de taludes y la presencia de fallas geológicas en la vecindad de Aguadilla. Estas se discuten más adelante. Las limitaciones particulares al karso incluyen la presencia de cuevas, el potencial de sumideros de colapso y la disposición de escorrentía y los posibles efectos que ésto tenga sobre el acuífero calizo. Las limitaciones relacionadas al karso se discuten a continuación.

1. **Cuevas**

Las cuevas y cavernas presentan una limitación dual a cualquier tipo de desarrollo. La primera tiene que ver con la problemática de la estabilidad de fundaciones construidas sobre aperturas cavernosas. Esta limitación se atiende mediante estudios geotécnicos detallados para el diseño de la ruta. La segunda limitación abarca una serie de valores sociales ajenos al proceso de construcción de una carretera. Estos incluyen valor arqueológico, valor como habitáculo de ecosistemas únicos, valor científico asociado a la presencia de espeleotemas[22] u otros rasgos geológicos y potencial para uso recreativo. Fue con estos criterios en mente que la ACT solicitó se enfatizara la identificación de cuevas durante el reconocimiento geológico de la ruta.

La Figura 6 muestra la localización aproximada de las cuevas identificadas a lo largo del Corredor durante este estudio, algunas de las cuales son sumideros que conectan con cuevas. La mayoría fueron encontradas durante el recorrido; otras habían sido identificadas durante el estudio arqueológico. En adición se contacto a varias entidades privadas dedicadas al estudio y protección de las cuevas de la isla, incluyendo a Amigos del Karso, la Sociedad Espeleológica de Puerto Rico (SEPRI) y la Sociedad de Estudios Espeleológicos del Norte, Inc. (SEENI), y se les preguntó si conocían de cuevas a lo largo del Corredor, a lo cual las respuestas fueron generalmente negativas (SEPRI indicó la presencia de cuevas en las paredes de los valles de los ríos Camuy y Guajataca; estas se incluyen en la Figura 6-6).

Como se puede apreciar en la Figura 6, la mayor concentración de cuevas ocurre en la Cordillera Jaicoa en la vecindad del tramo entre las Estaciones 400+00 y 420+00 (Figura 6-9). En ninguna de estas cuevas se observó rasgos geológicos sobresalientes. El estudio arqueológico (Rivera Calderón y Martínez Torres, 2004) determinó que una de éstas (localizada unos 150 metros al norte de la Estación 407+00 y denominada la Cueva del Indio Jaicoa) tiene valor arqueológico. Las otras

[22] Espeleotemas son las acumulaciones o depósitos minerals como estalactitas que se forman en las paredes de cuevas y lechos rocosos.

cuevas identificadas en el área de la Alterna Campo Traviesa parecen no tener valor arqueológico.

También es posible que haya cuevas en las partes del Corredor que no pudieron ser caminadas debido al espesor de la vegetación o lo accidentado de la topografía. Sin embargo, el hecho de que ninguna de las entidades espeleológicas consultadas tuviese conocimiento de cuevas en la ruta sugiere que aquellas que existan probablemente no poseen características que las distingan entre las cientos de cuevas que Monroe (1976) asevera existen en el Karso de Puerto Rico. En adición, el Corredor cruza varias zonas de colinas y cerros calizos que requerirán excavación y la construcción de cortes profundos para maximizar el diseño de la rasante de la ruta, y es probable que estas excavaciones expongan cuevas que actualmente no son accesibles. El valor que puedan tener estas tendrá que ser evaluado en su momento.

Finalmente, aunque se encuentra fuera del área de la Alterna Campo Traviesa, en la Cordillera Jaicoa hay un sistema de cavernas que tiene un río subterráneo y merece discusión. La existencia de este sistema, que lleva el nombre de la cueva que le da acceso, Cueva Cucaracha[23], es bien conocida en la comunidad espeleológica (fue identificado por Amigos del Karso, SEPRI y SEENI como un sistema espeleológico significativo), pero el mismo no ha sido extensamente explorado.

El Sistema de Cueva Cucaracha se encuentra al este y sur de la alineación del Corredor. La entrada es a través de un sumidero que conduce a Cueva Cucaracha; esta se ubica como a 1400 metros al este de la Estación 428+00 y unos 850 metros al este de la traza de una de las fallas identificadas por el USGS (la localización aproximada del sumidero se ilustra en la Figura 6-10; el sumidero se ve claramente en la Figura 1-5). El sistema consiste de una serie de pasajes cavernosos por los que discurre una corriente de agua supuestamente perenne que se ha nombrado Río Chico. El Prof. Tom Miller, PhD., especialista en karso adscrito al Departamento de Geología del Recinto Universitario de Mayagüez, es probablemente la persona que

[23] Este nombre proviene de la gran cantidad de estos ortópteros que habitan la cueva. El sistema supuestamente tiene una fauna variada y vibrante que incluye la boa puertorriqueña y un gran número de murciélagos, entre otros.

mejor conoce el sistema y lo describe como a la par con los mejor-conocidos tramos subterráneos del Río Camuy y el Río Encantado. El Dr. Miller ha explorado cerca de un kilómetro de pasajes subterráneos del sistema. Según él, estos se extienden en dirección norte a norte-noroeste, siendo esta última la orientación de las fallas geológicas identificadas en el cuadrángulo geológico. Esta coincidencia le hace sospechar que el sistema de cavernas puede haberse formado a consecuencia de un proceso de disolución acelerada a lo largo de una de las fallas geológicas.

En la Figura 6-10 se proyecta el Sistema de Cueva Cucaracha/Río Chico un kilómetro en dirección norte-noroeste desde la entrada del sistema (el área estudiada por el Dr. Miller). Esto ubica al sistema a una distancia de unos 700 metros del centro de la alineación en su punto más cercano (cerca de la Estación 415) y de seguir con esta trayectoria eventualmente pasaría por debajo de la ruta. La cercanía a la alineación aumenta la posibilidad de que la construcción y uso del expreso tenga un impacto sobre el sistema. Los posibles impactos incluyen cambios en el caudal y/o en el patrón de recarga del Río Chico y la introducción de sustancias foráneas que podrían afectar a los diferentes elementos del sistema de manera adversa. Desafortunadamente, la información sobre el sistema que hay disponible es mínima, y resulta prematuro especular sobre posibles efectos del proyecto.

2. Sumideros de Colapso

Gran parte de los tramos entre las Estaciones 80+00 a 190+00 y 244+00 a 386+00, discurren por llanuras que contienen Depósitos de Manto cuyo espesor alcanza hasta más de 20 metros (65 pies). Si se pudiese remover el suelo superficial veríamos que las llanuras son grandes depresiones donde la superficie de la caliza se ha rebajado por debajo del nivel de las calizas que forman los mogotes circundantes. Esto sugiere que las calizas subyacentes son más permeables que las que forman los mogotes. En efecto, la superficie es altamente irregular y la caliza que la forma está carcomida por cavidades de disolución, muchas de las cuales contienen suelo de los Depósitos de Manto que se erosiona y transporta a través de los pasajes subterráneos

por la escorrentía que se infiltra por el suelo. Esta erosión subterránea ha producido los numerosos sumideros que ocurren en los llanos, muchos de los cuales han experimentado y son susceptibles a futuros colapsos repentinos (Figura 7).

La Figura 6 muestra los sumideros identificados en o cerca del Corredor durante este estudio. Algunos aparecen en los cuadrángulos topográficos (Figura 1) pero la gran mayoría fueron identificados usando las fotografías aéreas (y subsiguientemente fueron confirmados en el campo). Algunos fueron identificados durante el recorrido de campo, pero estos generalmente son relativamente pequeños y pasan desapercibidos en las fotos aéreas, u ocurren en áreas de bosques que esconden las depresiones en las fotos.

Dada la densidad de sumideros en algunos tramos de la ruta, será difícil evitar que la alineación pase sobre un número de las depresiones. Los sumideros son focos de infiltración para la escorrentía que se genera en los llanos y los mogotes circundantes y esto conlleva un potencial para el desarrollo de colapsos, por lo que será necesario implementar medidas para minimizar este peligro. Se han usado varios enfoques para prevenir daños debido al colapso de sumideros. Algunas de las alternativas son: desviar la escorrentía a otro sumidero distante de la alineación para minimizar la infiltración y el potencial de colapso cerca de la ruta; construir un puente para cruzar la depresión; impermeabilizar el piso del sumidero y construir pozos de inyección que transfieran la escorrentía directamente a la caliza subyacente, de esta manera evitando la infiltración y erosión de los suelos; excavar y remover los Depósitos de Manto hasta la superficie de la caliza y rellenar hasta la rasante construyendo un filtro de material drenante que no sufra erosión; y, finalmente, construir una sobrecarga sobre el sumidero con la intención de causar el colapso de cualquier cavidad que haya en el suelo previo a la construcción, acompañado esto por otras medidas que inhiban el flujo de escorrentía al sumidero. La selección de la(s) alternativa(s) es parte del proceso de diseño de la ruta y requerirá estudio detallado de aquellos sumideros que vayan a ser modificados.

El tramo entre las Estaciones 244+00 a 386+00 cruza el Canal Principal de Derivación y el Canal de Moca propiedad de la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE)[24]. La incidencia de colapso aumenta en las cercanías de estas estructuras debido a filtraciones de las aguas de los canales. Esto podría presentar un problema en el sentido de que la ACT no tiene control sobre el mantenimiento del canal y aquellas secciones de la carretera que estén cerca de los canales podrían afectarse por colapsos ocasionados por falta de mantenimiento de los canales.

Otra limitación relacionada a los sumideros de colapso es la disposición de las aguas de escorrentía que se generan en el proyecto. En los tramos de la Alterna Campo Traviesa donde el terreno drena superficialmente la escorrentía puede ser vertida en cañadas y valles que son parte de un sistema que eventualmente drena al mar. Sin embargo, en los tramos que carecen drenaje superficial hay que transferir la escorrentía al sistema de agua subterránea y el conducto natural para esto son los sumideros. Esto es lo que se ha hecho históricamente en la región kárstica para todo tipo de proyecto.

Hay que considerar el potencial de colapso al diseñar los sistemas para la disposición de escorrentía, particularmente en vista de que el sistema de disposición típicamente causa un incremento en la escorrentía que llega a un sumidero dado. Esto obviamente representa un riesgo mayor de colapso debido a que se incrementa el potencial de erosión subterránea, por lo que el sistema de disposición usualmente incluye medidas para combatir la erosión y el colapso como las resumidas arriba. Un incremento en escorrentía también aumenta la disolución de la caliza. Esto es algo que normalmente no se considera en el diseño de los sistemas de drenaje debido a que la disolución es un proceso lento y se asume que el aumento en el desgaste de la caliza no es significativo medido en término de la vida útil del proyecto; ciertamente no conocemos de ningún caso que reporte un aumento en la disolución de la caliza que haya tenido efectos adversos. No obstante, esto es algo que se debe evaluar

[24] Estos canales transfieren agua proveniente del Embalse Guajataca a los Municipios de Isabela, Moca y Aguadilla.

particularmente si el diseño de la carretera contempla grandes aumentos en descarga en algún(os) sumidero(s) del Corredor.

3. Recarga del Acuífero Calizo

El acuífero freático de la parte noroeste de la isla se recarga en la zona de afloramiento de las calizas Aguada y Aymamón. Se ha señalado que en la actualidad el acuífero calizo en la zona de la Alterna Campo Traviesa está subdesarrollado debido en parte a que los canales de riego fungen como fuente de agua potable. Sin embargo, para que el área continúe creciendo y desarrollándose es probable que en algún momento sea necesario extraer agua del acuífero. Gran parte de la Alterna Campo Traviesa discurre sobre la Caliza Aymamón (incluyendo los tramos en que ésta subyace los Depósitos de Manto). Es probable que la escorrentía proveniente de algunos tramos de la carretera nueva se disponga por medio de sumideros cercanos a la ruta. Debido a que estas aguas estarán impactadas por hidrocarburos provenientes de los vehículos que transiten la ruta, existe el potencial de que se afecte la calidad del agua del acuífero. El diseño del sistema pluvial que dispondrá de la escorrentía generada por la carretera deberá incluir medidas para tratar las aguas de escorrentía previo a su infiltración al subsuelo.

4. Deslizamientos

Varios tramos de la Alterna Campo Traviesa cruzan terrenos afectados por deslizamientos. Los más significativos son los cruces de los ríos Camuy y Guajataca y la bajada por el Escarpe de Lares. A pesar de ser extenso, el material coluvial que se ha acumulado en los desfiladeros de los ríos Camuy y Guajataca no debe presentar mayores problemas a la carretera debido a que estos valles serán cruzados por puentes cimentados en roca caliza en la cresta de los valles y fuera de los depósitos coluviales. Sin embargo, el diseño de estas estructuras deberá tomar en consideración que este material coluvial proviene de desprendimientos en las paredes de los acantilados.

Según se ha descrito, las condiciones geológicas a lo largo del Escarpe de Lares son susceptibles al desarrollo de grandes deslizamientos y la evidencia observada durante este estudio indica que ese ha sido el caso en el tramo de la ruta que lo cruza (Estación 440+00 a 446+00). La construcción de este tramo confronta dos problemas relacionados. Primero, prevenir la inestabilización y reactivación de los deslizamientos existentes y, segundo, evitar que la obra cree nueva inestabilidad en el Escarpe de Lares. El diseño de este tramo requerirá estudios geológico/geotécnicos minuciosos que provean un entendimiento detallado de la distribución y propiedades geotécnicas de los materiales terrestres presentes en el Escarpe, del régimen de agua subterránea en la zona y de la interacción de los factores que causan la inestabilidad en el área. Indudablemente la ACT reconoce la fragilidad de la estabilidad en estos terrenos habiendo tenido que lidiar con deslizamientos complejos durante la construcción de carreteras que cruzan el escarpe en Ciales, Utuado, Lares y San Sebastián. Estas obras se han completado o están en proceso de terminarse.

En menor escala está la problemática de la estabilidad de los depósitos coluviales de menor extensión que ocurren en muchos mogotes y colinas calizas. Actualmente la estabilidad de estos depósitos es marginal y su excavación mal planificada puede ocasionar que el material se deslice. En Bayamón recientemente ocurrió un deslizamiento coluvial relativamente grande luego de que se excavara un corte pequeño (menos de 2 metros de altura) en la base de una hilera de mogotes. La impresión de muchos que lo observaron fue que la magnitud de la falla no guardaba proporción a la excavación que la ocasionó, pero este sentir desaparece cuando recordamos que los depósitos coluviales son inherentemente inestables. Será necesario delinear la extensión de estos depósitos durante los estudios de diseño para que se puedan implementar medidas dedicadas a prevenir la ocurrencia de estas fallas.

5. Fallas Geológicas

El USGS identificó cuatro fallas geológicas en el área de la Cordillera Jaicoa, tres de las cuales intersecan la alineación entre las Estaciones 410+00 a 417+00 (Figuras 1-5 y 6-10). Una falla geológica presenta varios problemas para un desarrollo. Primero, si está activa[25] hay que anticipar los desplazamientos que pudiesen ocurrir a lo largo de la falla durante un evento sísmico. El diseño del proyecto también tendría que tomar en consideración la naturaleza del evento sísmico (i.e, magnitud, aceleraciones, etc.). Finalmente, hay que evaluar las características físicas de la falla y cómo estas afectan el proyecto. Las fallas son fracturas o roturas en la corteza terrestre que envuelven desplazamientos relativos entre los materiales que se encuentran en lados opuestos de la falla. Pueden ser una fractura individual o una zona de roca triturada o suelo molido. Obviamente el material presente en la falla difiere del material intacto y por lo general las fallas se consideran zonas de debilidad en la masa terrestre. Las fallas también pueden actuar como zonas de alta permeabilidad que facilitan el movimiento de agua subterránea de manera que pudiesen localizar rasgos de disolución que requieren evaluación para el proyecto.

Las fallas identificadas por el USGS no fueron vistas en el campo, pero esto podría ser debido a la falta de afloramientos adecuados a lo largo de las trazas marcadas en el cuadrángulo geológico. Sí se observó lo que podría ser una zona de roca fracturada (la alternativa es que los rasgos son el producto de solución, colapso y recementación) cerca de una de las trazas; también se observó una falla cerca de la cuarta traza de falla ilustrada por el USGS, aunque el desplazamiento en ésta parece ser considerablemente menos que el desplazamiento máximo reportado por el USGS.

[25] Una falla activa es una falla que podría experimentar desplazamiento futuro bajo el régimen tectónico existente. Usualmente se define en base a cuan recientemente sufrió el último movimiento y el tipo de estructura que se evalúa; por ejemplo, las consecuencias de fallamiento en la base de una represa son considerablemente mayores que si la estructura es un almacén en una zona industrial por lo que el término de tiempo que se considera para designar actividad es mucho mayor en el caso de la represa. La mayoría de las pautas establecen que el movimiento más reciente debe haber ocurrido durante el Holoceno o el Cuaternario para que la falla se considere activa.

Estas fallas se consideran inactivas. No obstante, requieren estudio detallado durante la etapa de diseño del proyecto para determinar las características geotécnicas de los materiales presentes en las zonas de falla.

VI. CLAUSURA

Este informe describe la geología a lo largo del propuesto Corredor PR-22 y resalta algunos de los aspectos geológicos críticos al proyecto. El mismo fue preparado como el componente geológico de la DIA-P que GOA prepara para el proyecto. La evaluación realizada es consistente con los criterios generalmente aceptados para estudios de esta naturaleza. Solicitamos se nos consulte de haber preguntas sobre la intención o el contenido del informe, y se nos notifique si hay cambios en el ámbito del proyecto que puedan requerir una re-evaluación de las recomendaciones presentadas.

Atentamente,

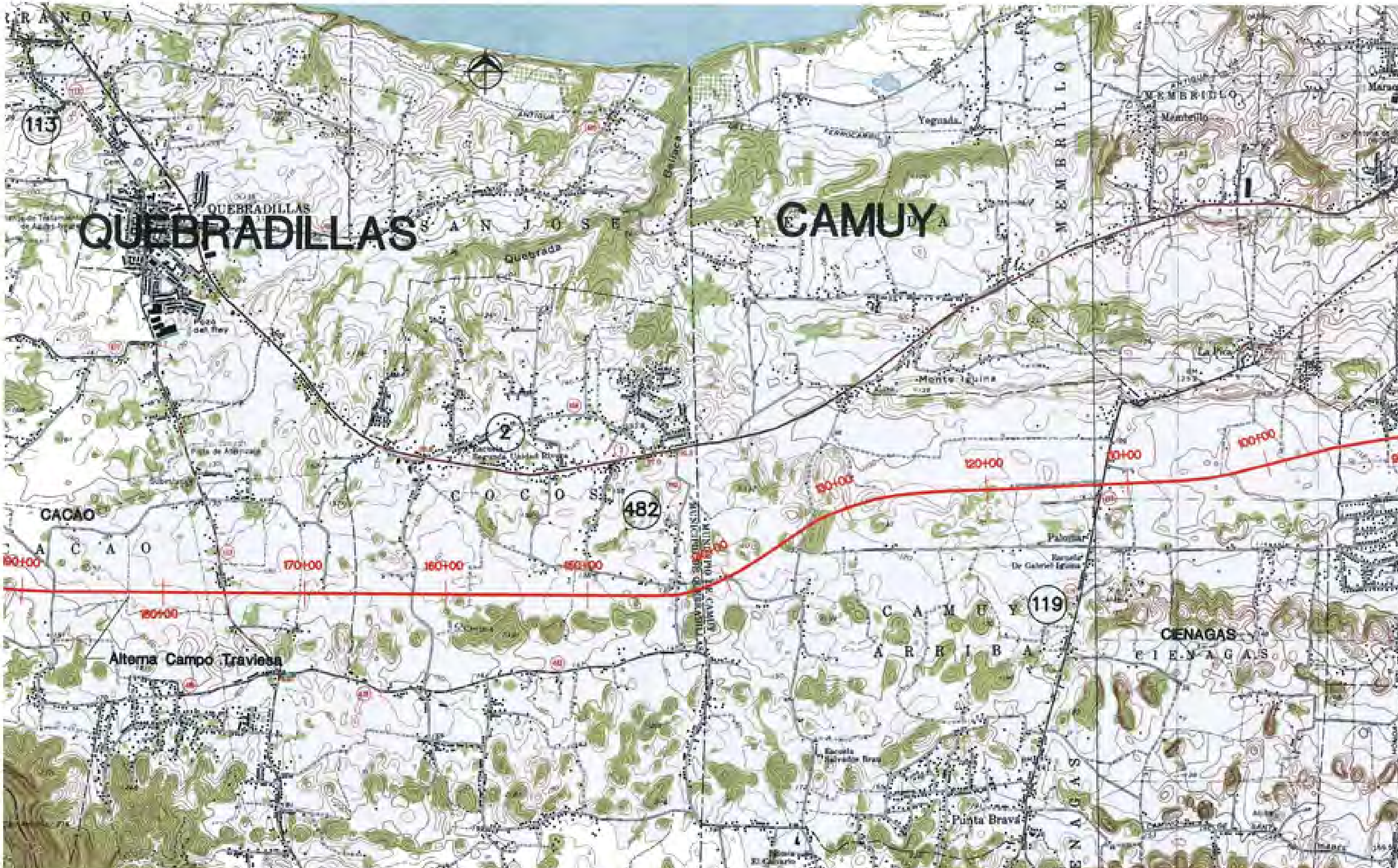
LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOCIM, INC.

Alejandro E. Soto, PG
Asociado

Mayo de 2006

GeoCim	LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST. GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007	Plano de localización del proyecto Alterna Campo Traviesa	Corredor Hatillo-Aguadilla		DRW. BY: G.O.G. FIGURE NO: 1
			DATE: 12/29/05	JOB NO: 3210-04 CKD. BY: A.S. SCALE: N.T.S.	SHEET: 1 OF 5

Dawing: F:/Auto Cad/drawings/3210-04 PR-22/Fig 5 GEOLOGIC



GeoCim

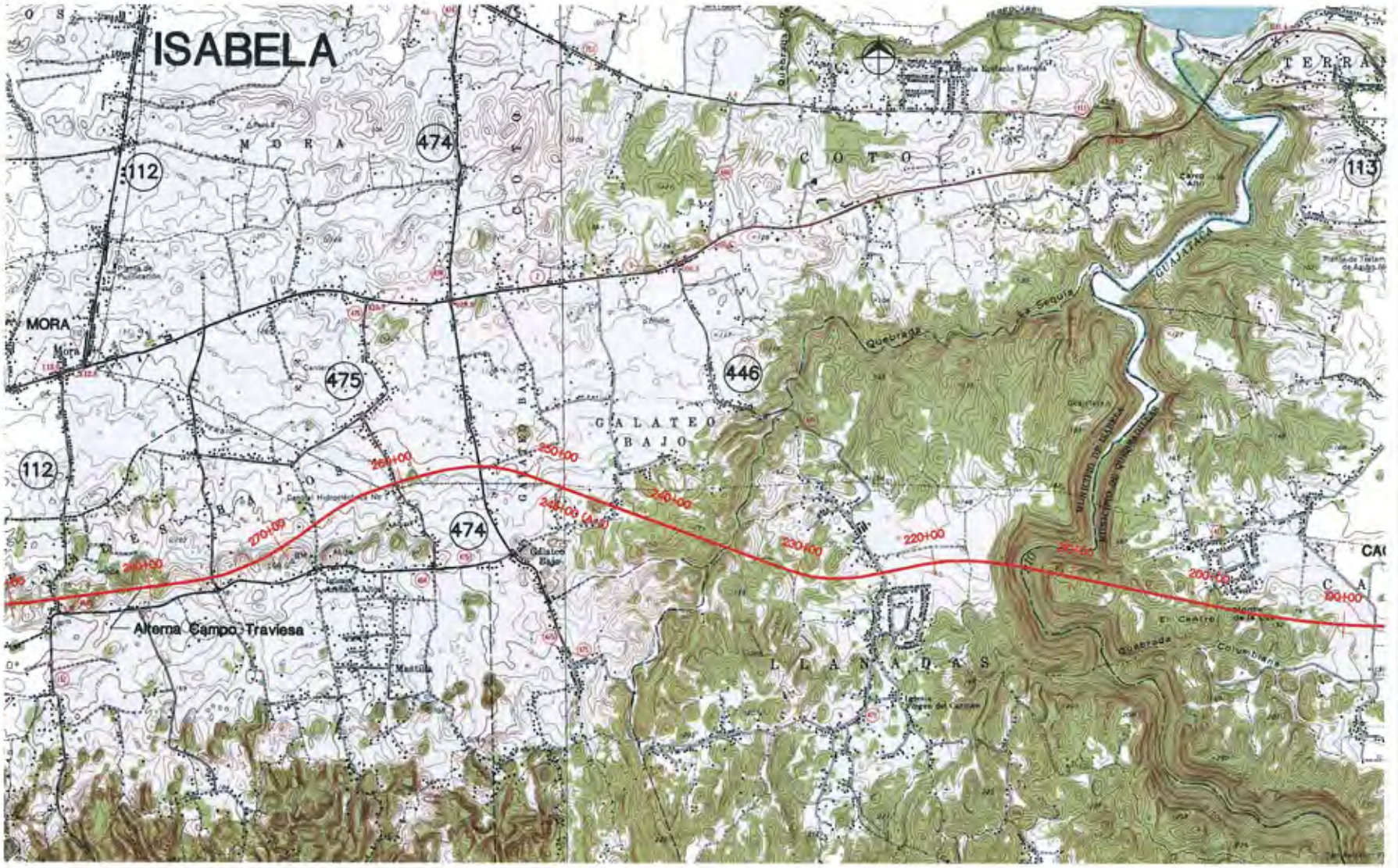
LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS
AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST.
GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007

Plano de localización del proyecto
Alterna Campo Traviesa

Corredor Hatillo-Aguadilla

DATE: 12/29/05	JOB NO: 3210-04	CKD. BY: A.S.	SCALE: N.T.S.	DRW. BY: G.O.G. / FIGURE NO: 1 / SHEET: 2 OF 5

Giovanni: F:/Auto Cad/drawings/3210-04 PR-22/Fig 5 GEOLOGIC



GeoCim

LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS
AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST.
GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007

Plano de localización del proyecto Alterna Campo Traviesa

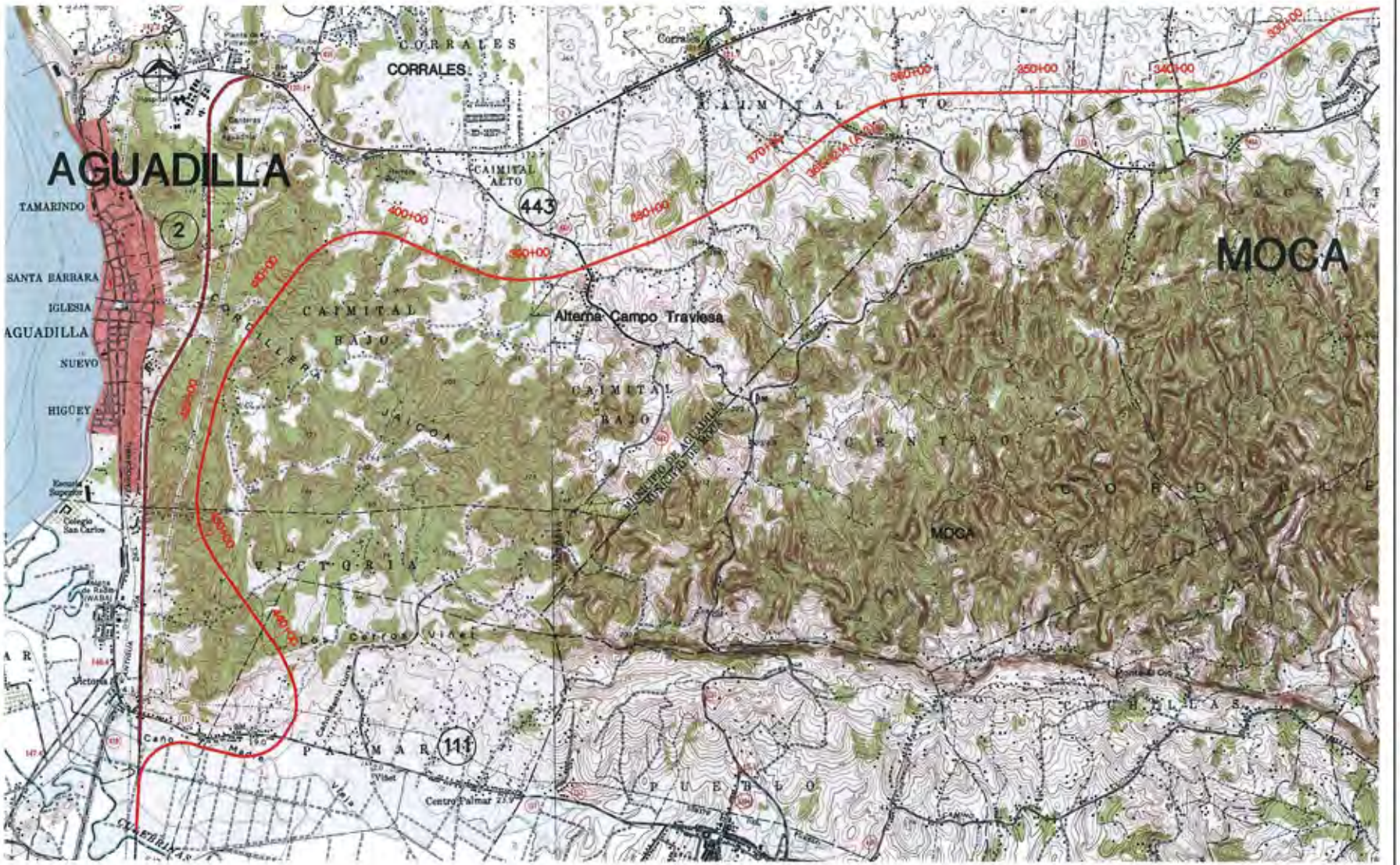
Corredor Hatillo–Aguadilla

DATE:	JOB NO:	CKD. BY:	SCALE:	DRW. BY:	FIGURE NO:	SHEET:
12/29/05	3210-04	A.S.	N.T.S.	G.O.G.	1	3 OF 5

Giovanni: F:/Auto Cad/drawings/3210-04 PR-22/Fig 5 GEOLOGIC

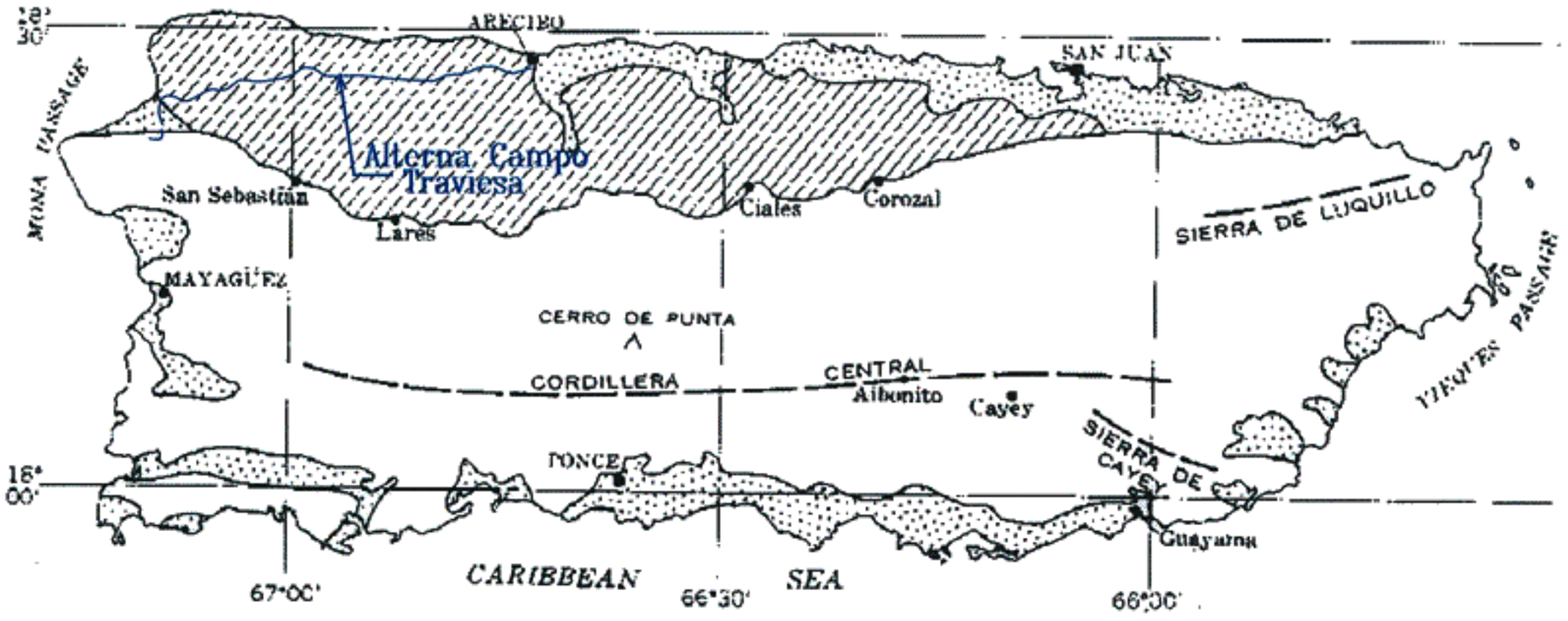
GeoCim	LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST. GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007	Plano de localización del proyecto Alterna Campo Traviesa	Corredor Hatillo-Aguadilla			DRW. BY: G.O.G. FIGURE NO: 1
			DATE: 12/29/05	JOB NO: 3210-04	CKD. BY: A.S.	SCALE: N.T.S. SHEET: 4 OF 5

G:\evenni, F:\Autu Cad\drawings\3210-04 PR-22\Fig 5 GEOLOGIC

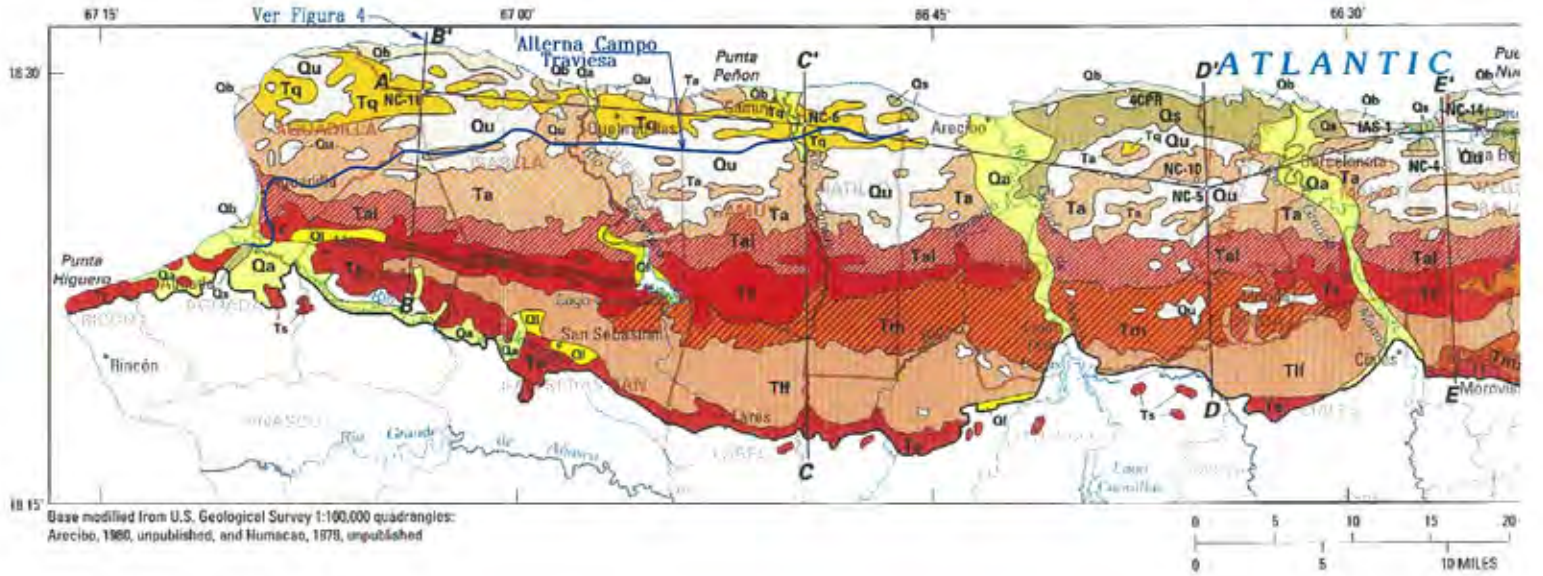


GeoCim	LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST. GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007	Plano de localización del proyecto Alterna Campo Traviesa	Corredor Hatillo–Aguadilla		DRW. BY: G.O.G. FIGURE NO: 1
			DATE: 12/29/05	JOB NO: 3210-04 / CKD. BY. A.S. / SCALE: N.T.S.	SHEET: 5 OF 5

Gloveris F:/Auto Cad/drawings/3210-04 PR-22/Fig 5 GEOLOGIC



GeoCim LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES	Regiones fisiográficas de Puerto Rico Alterna Campo Traviesa (Corredor Hatillo–Aguadilla)					
	DRW. BY: G.O.G.	CKD. BY: A.S.	SCALE: N.T.S.	DATE: 12/29/05	JOB. NO: 3210–04	FIGURE NO: 2



EXPLANATION

Quaternary deposits

- Qa — Alluvium
- Ql — Landslide deposits
- Qb — Beach deposits
- Qs — Swamp, marsh deposits
- Qaf — Artificial fill
- Qu — Undifferentiated surficial deposits

Pliocene and Miocene rocks

- Tq — Quebradillas Limestone

Miocene rocks

- Ta — Aymamón Limestone
- Tal — Aguada (Los Puertos) Limestone
- Tc — Cibao Formation
- Tm — Montebello Limestone Member
- Tqa — Quebrada Arenas Limestone Member—Includes Miranda Sand Member
- Tr — Río Indio Limestone Member—Includes Almirante Sur Lentil
- Tg — Guajataca Member

Miocene and Oligocene rocks

- Tmca — Mucarabones Sand
- Tll — Lares Formation
- Ts — San Sebastián Formation

A — A' Line of hydrogeologic section

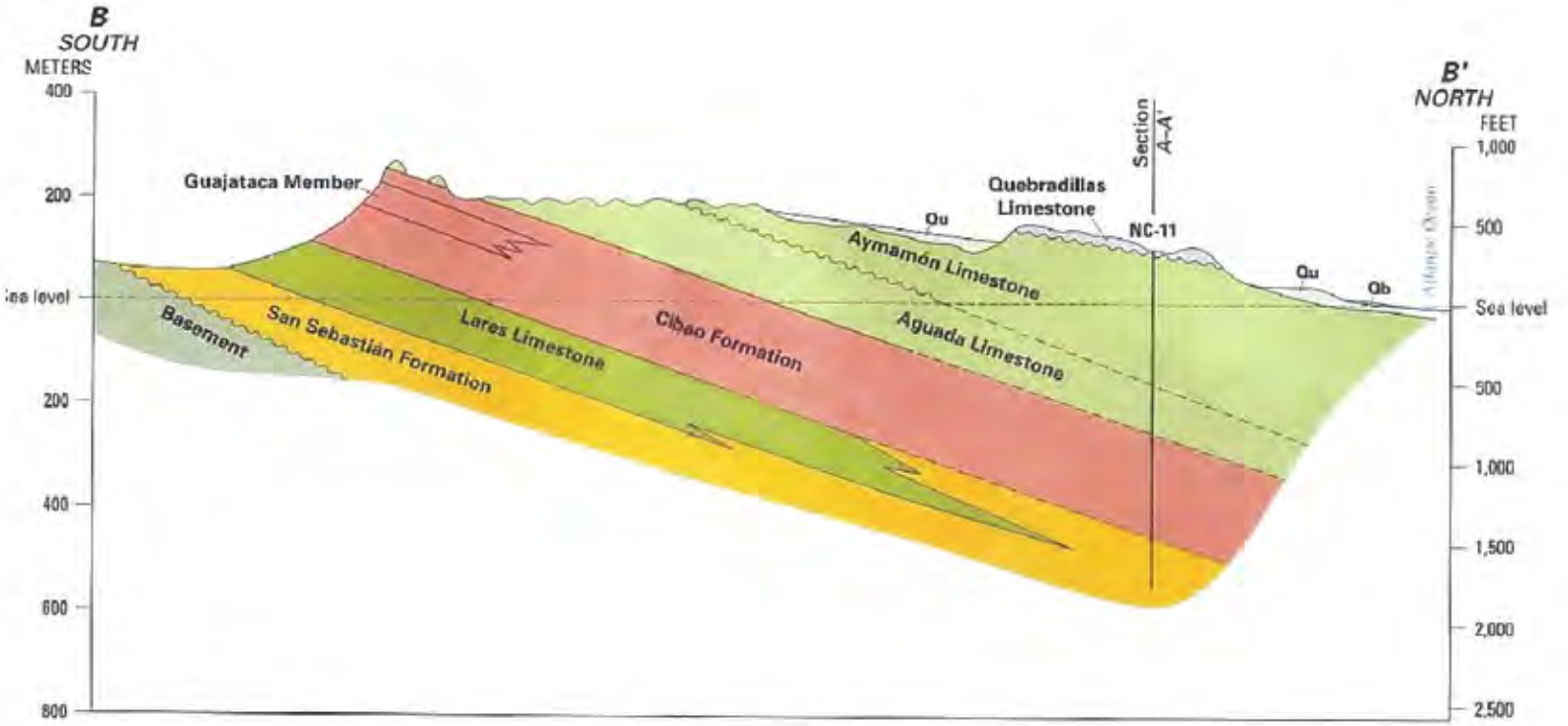
Southern extent of rocks of Middle Oligocene to Pliocene age

Contact

NC-11 Well control point and number

Fuente: Rentgen y otros, 2002

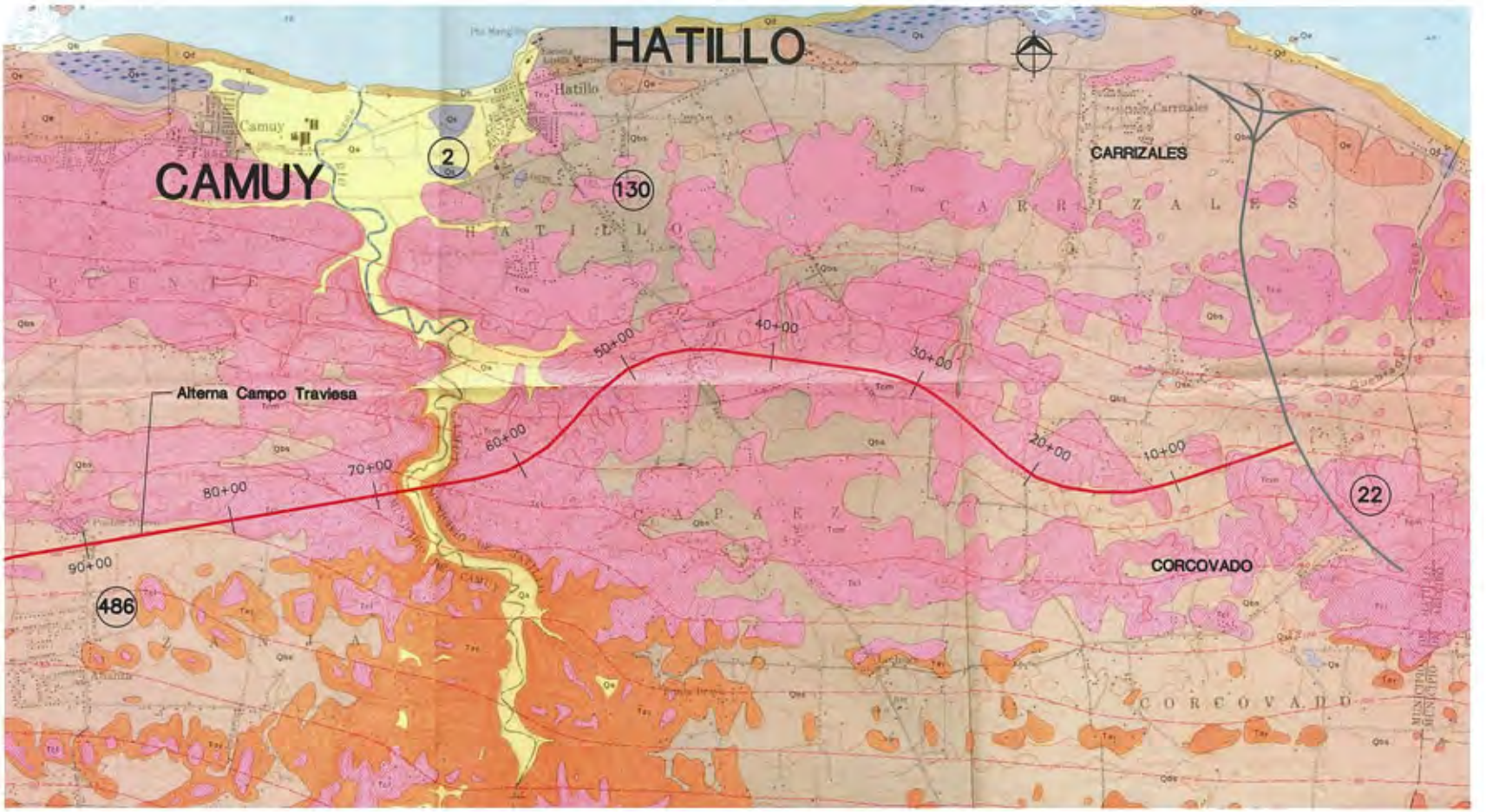
GeoCim — LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST. GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007	Mapa geológico de la Zona Kársica	Corredor Hatillo–Aguadilla			DRW. BY: G.O.G.
		DATE: 12/29/05	JOB NO: 3210-04	DRG. BY: A.S.	SCALE: N.T.S. / FIGURE NO: 3



- La exageración vertical es de 6.6X.
- La localización del perfil se indica en la Figura 3.

Giovanni: F:/Auto Cad/drawings/3210-04 PR-22/FIG 3-4-5

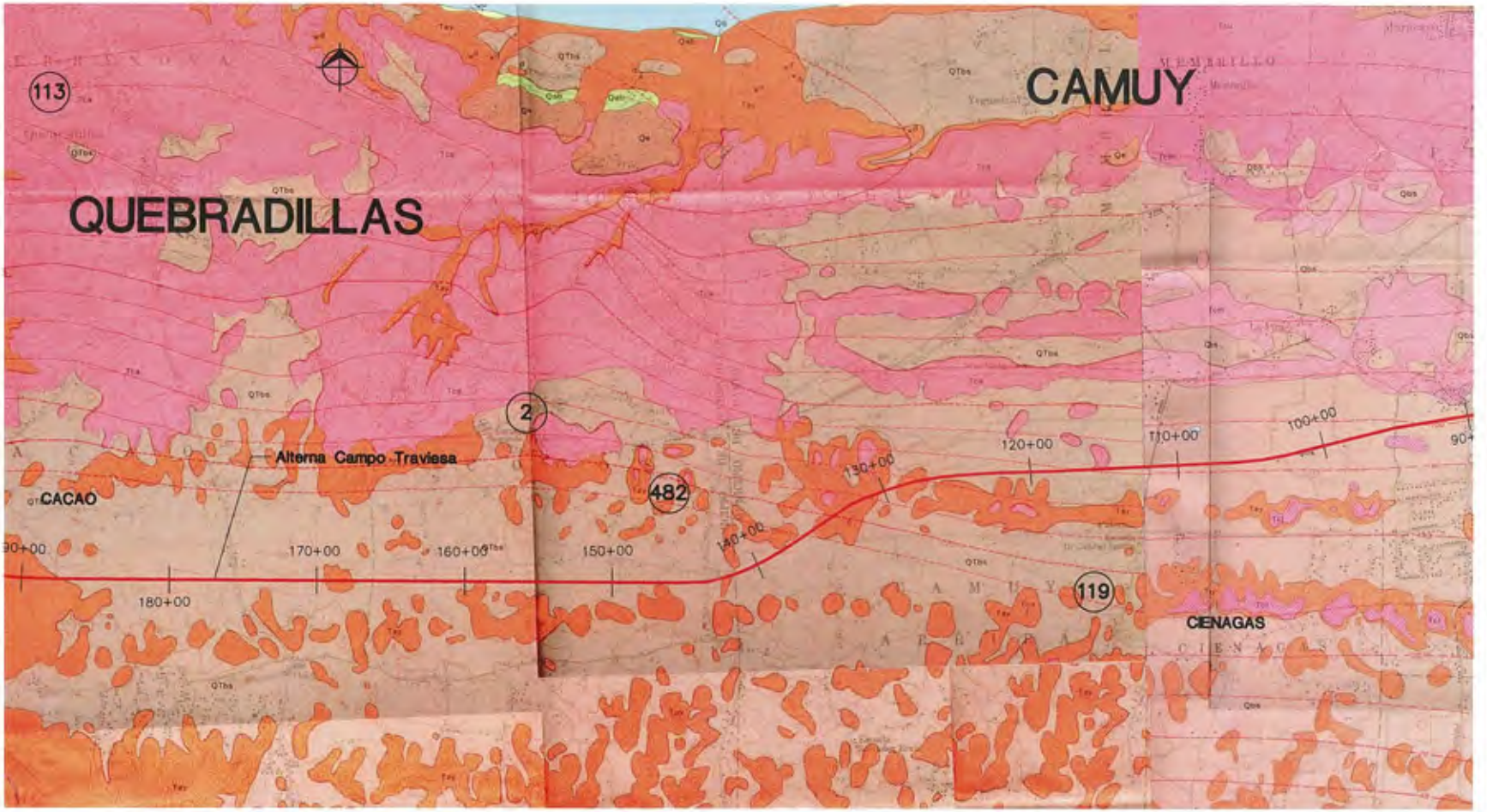
GeoCim	LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST. GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007	Perfil norte-sur a través de la Zona Kársica	Corredor Hatillo-Aguadilla			DRW. BY: G.O.G.
			DATE: 12/29/05	JOB NO: 3210-04	CKD. BY: A.S.	SCALE: N.T.S.	FIGURE NO: 4



* Tomado de los Cuadrángulos Geológicos publicados por el USGS.

GeoCim	LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST. GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007	Geología a lo largo de la ruta Alterna Campo Traviesa	Corredor Hatillo-Aguadilla		DRW. BY: G.O.G. FIGURE NO: 5 SHEET: 1 OF 5
			DATE: 12/29/05	JOB NO: 3210-04 CKD. BY: A.S. SCALE: N.T.S.	

N:\GOAS\2453\ALEX SOTO\Geologic_map camuy Alt A.dwg, 03/16/2006 09:29:26 AM, rodri-20
Giovanni, F:/Auto Cad/drawings/3210-04 PR-22/Fig 5 GEOLOGIC

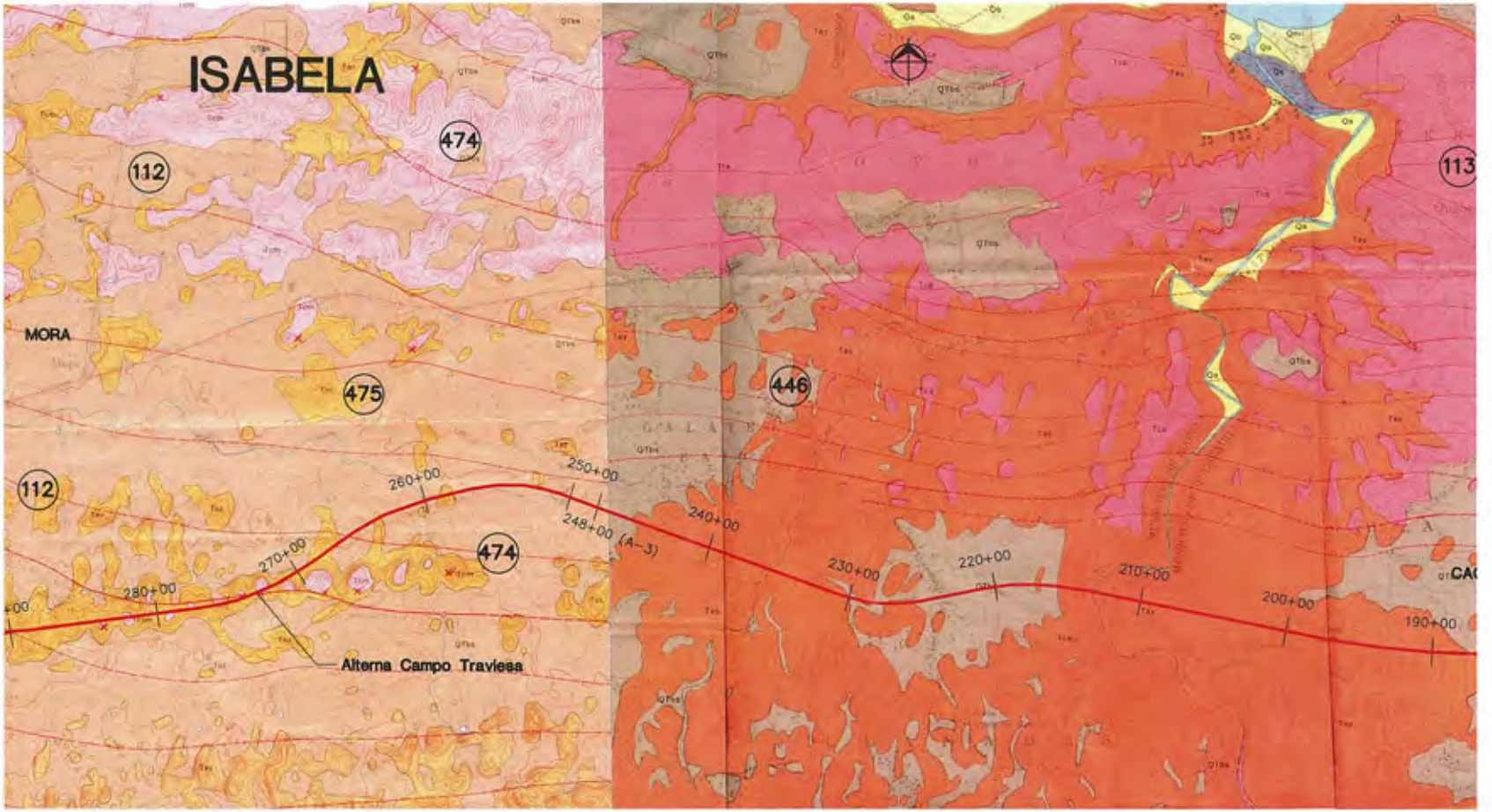


* Tomado de los Cuadrángulos Geológicos publicados por el USGS.

GeoCim	LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST. GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007	Geología a lo largo de la ruta Alterna Campo Traviesa	Corredor Hatillo-Aguadilla		DRW. BY: G.O.G. FIGURE NO: 5
			DATE: 12/29/05	JOB NO: 3210-04	CKD. BY: A.S. SCALE: N.T.S. SHEET: 2 OF 5

N:\GOAS\2453\ALEX SOTO\Geologic_map camuy Alt A.dwg, 03/16/2006 09:30:24 AM, rodri-20

Giovanni: F:/Auto Cad/drawings/3210-04 PR-22/Fig 5 GEOLOGIC



* Tomado de los Cuadrángulos Geológicos publicados por el USGS.

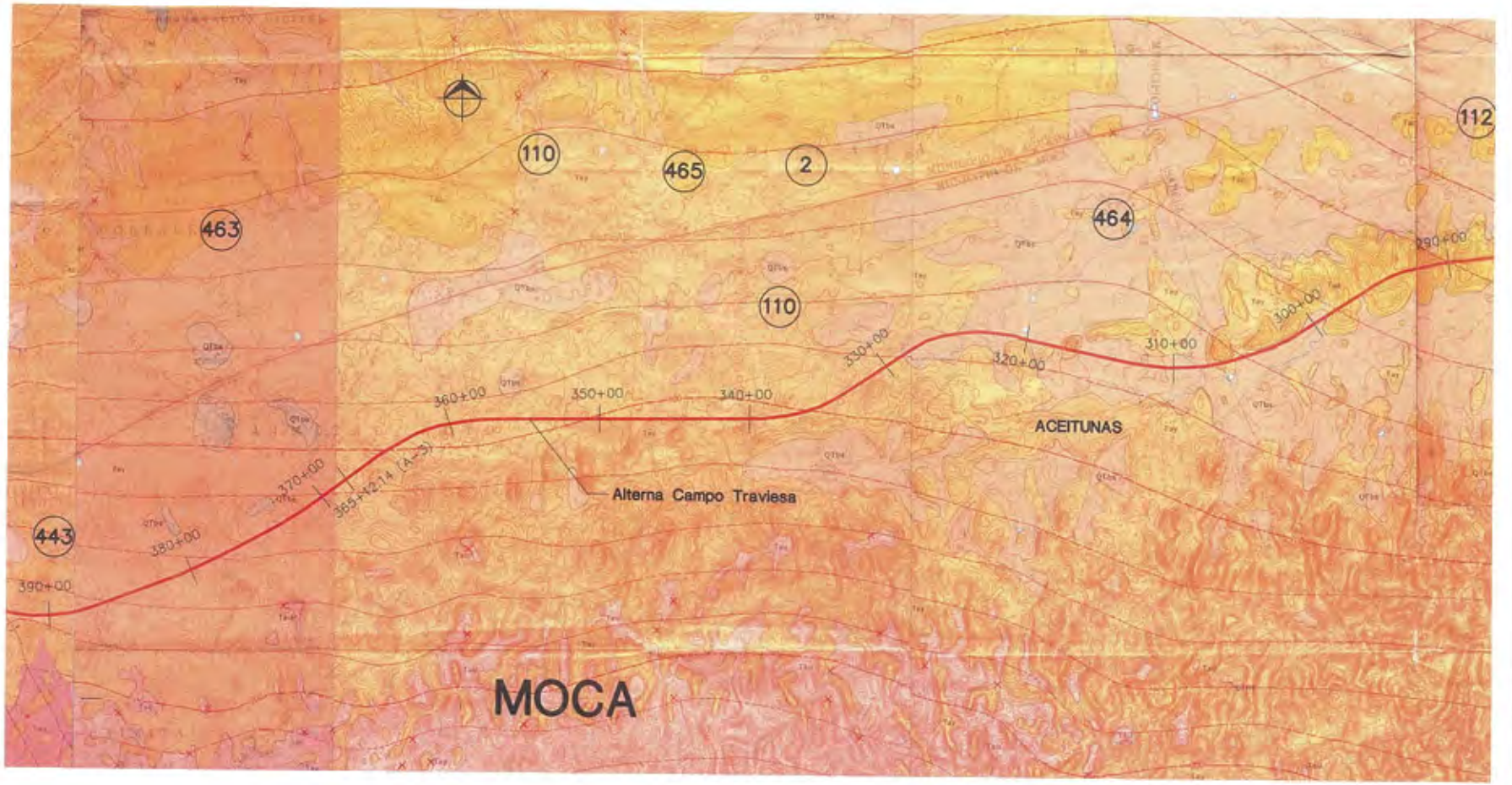
GeoCim
LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS
AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST.
GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007

Geología a lo largo de
la ruta Alterna Campo Traviesa

Corredor Hatillo–Aguadilla

DATE:	JOB NO:	CKD. BY:	SCALE:	DRW. BY:	FIGURE NO:	SHEET:
12/29/05	3210-04	A.S.	N.T.S.	G.O.G.	5	3 OF 5

N:\GOAS\2453\ALEX SOTO\Geologic_map camuy Alt A.dwg, 03/16/2006 08:08:00 AM, rodri-20
Giovanni F:/Auto Cad/drawings/3210-04 PR-22/Fig 5 GEOLOGIC



* Tomado de los Cuadrángulos Geológicos publicados por el USGS.

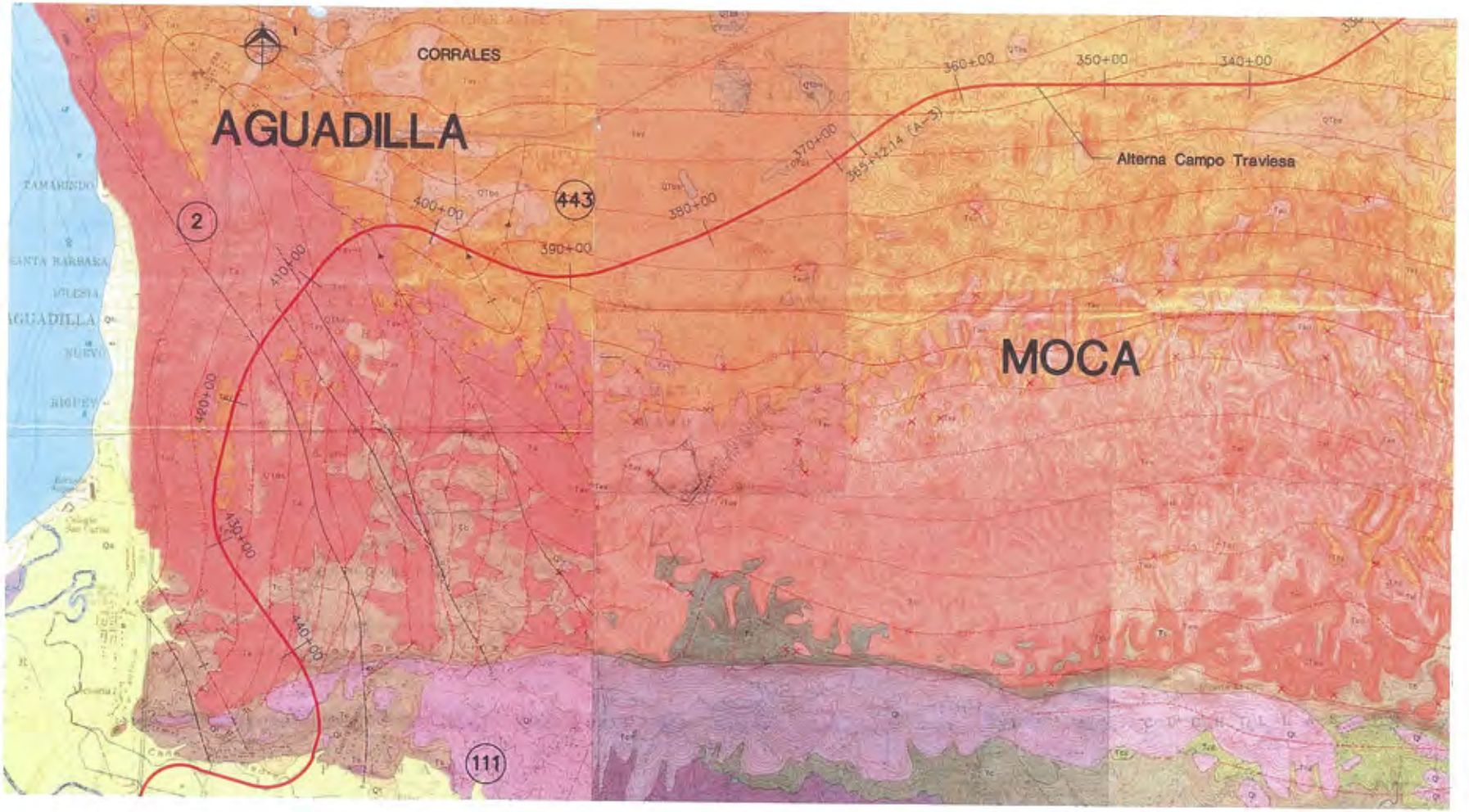
GeoCim
LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS
AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST.
GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007

Geología a lo largo de
la ruta Alterna Campo Traviesa

Corredor Hatillo–Aguadilla

DATE:	JOB NO:	CKD. BY:	SCALE:	DRW. BY:	FIGURE NO:	SHEET:
12/29/05	3210-04	A.S.	N.T.S.	G.O.G.	5	4 OF 5

N:\GOAS\2453\ALEX SOTO\Geologic_map camuy Alt A.dwg, 01/31/2006 02:07:38 PM, J.Santiago
Giovanni F:/Auto Cad/drawings/3210-04 PR-22/Fig 5 GEOLOGIC



* Tomado de los Cuadrángulos Geológicos publicados por el USGS.

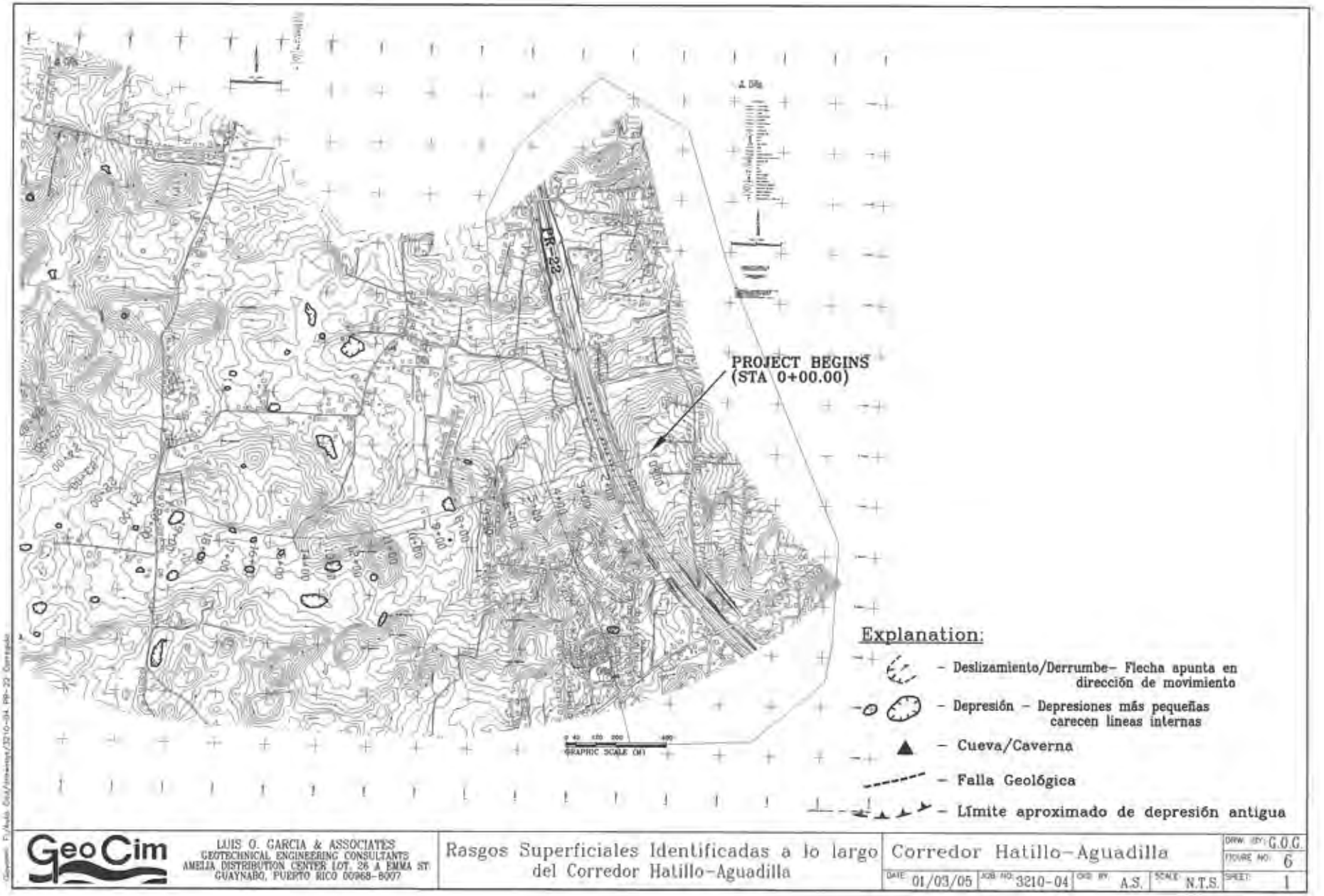
GeoCim
LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS
AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST.
GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007

Geología a lo largo de la ruta Alterna Campo Traviesa

Corredor Hatillo–Aguadilla

DATE	JOB NO	CKD. BY	SCALE	DRW. BY	FIGURE NO	SHEET
12/29/05	3210-04	A.S.	N.T.S.	G.O.G.	5	5 OF 5

N:\GOAS\2453\ALEX SOTO\Geologic_map camuy Alt A.dwg, 01/31/2006 02:06:44 PM, J.Santiago
Giovanni F:/Auto Cad/drawings/3210-04 PR-22/Fig 5 GEOLOGIC



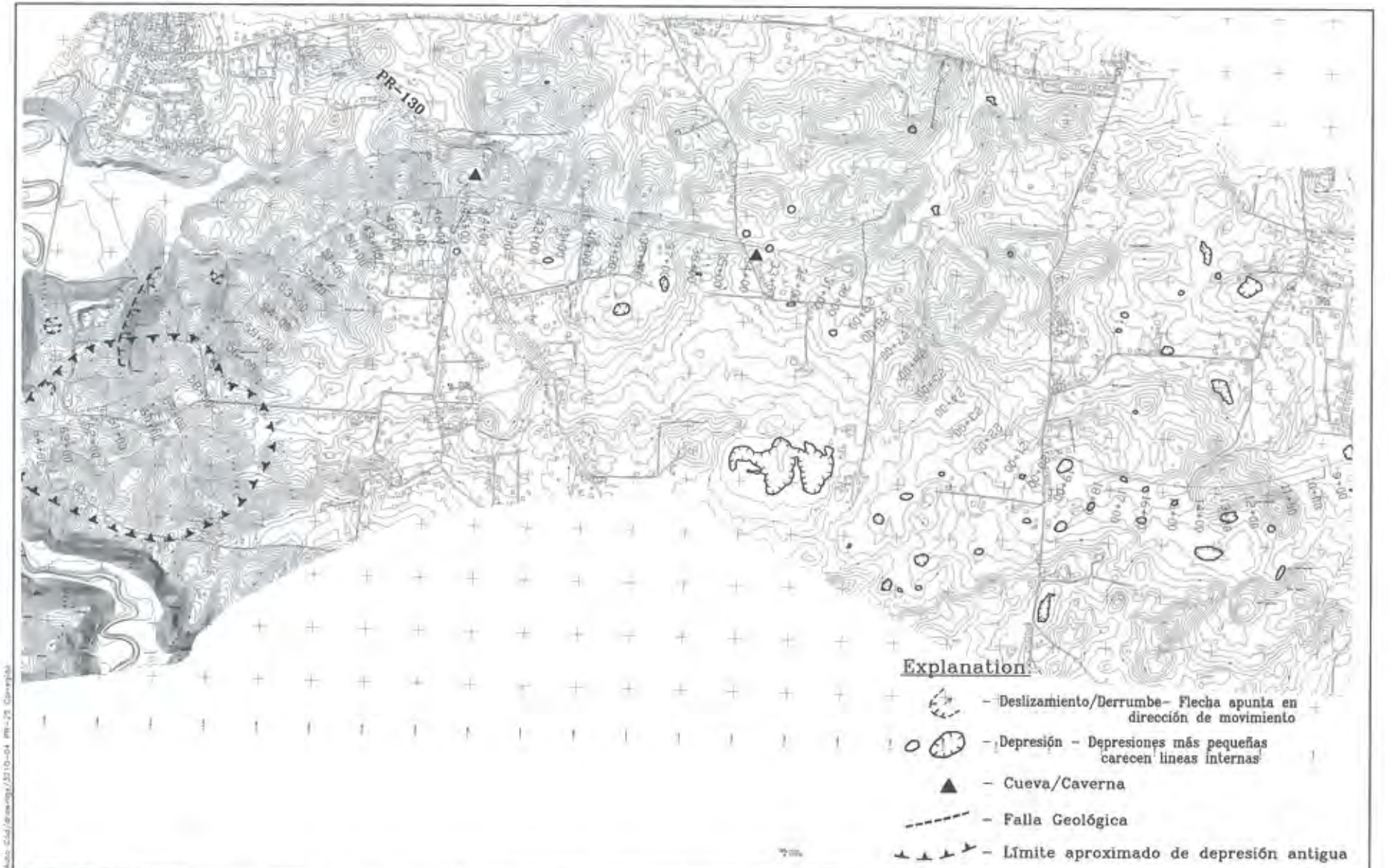
GeoCim

LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS
AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST.
GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007

Rasgos Superficiales Identificadas a lo largo del Corredor Hatillo-Aguadilla

Corredor Hatillo-Aguadilla

DRW. BY: G.O.C.	FIGURE NO: 6
DATE: 01/03/05	JOB NO: 3210-04
CKD. BY: A.S.	SCALE: N.T.S.
SHEET: 1	



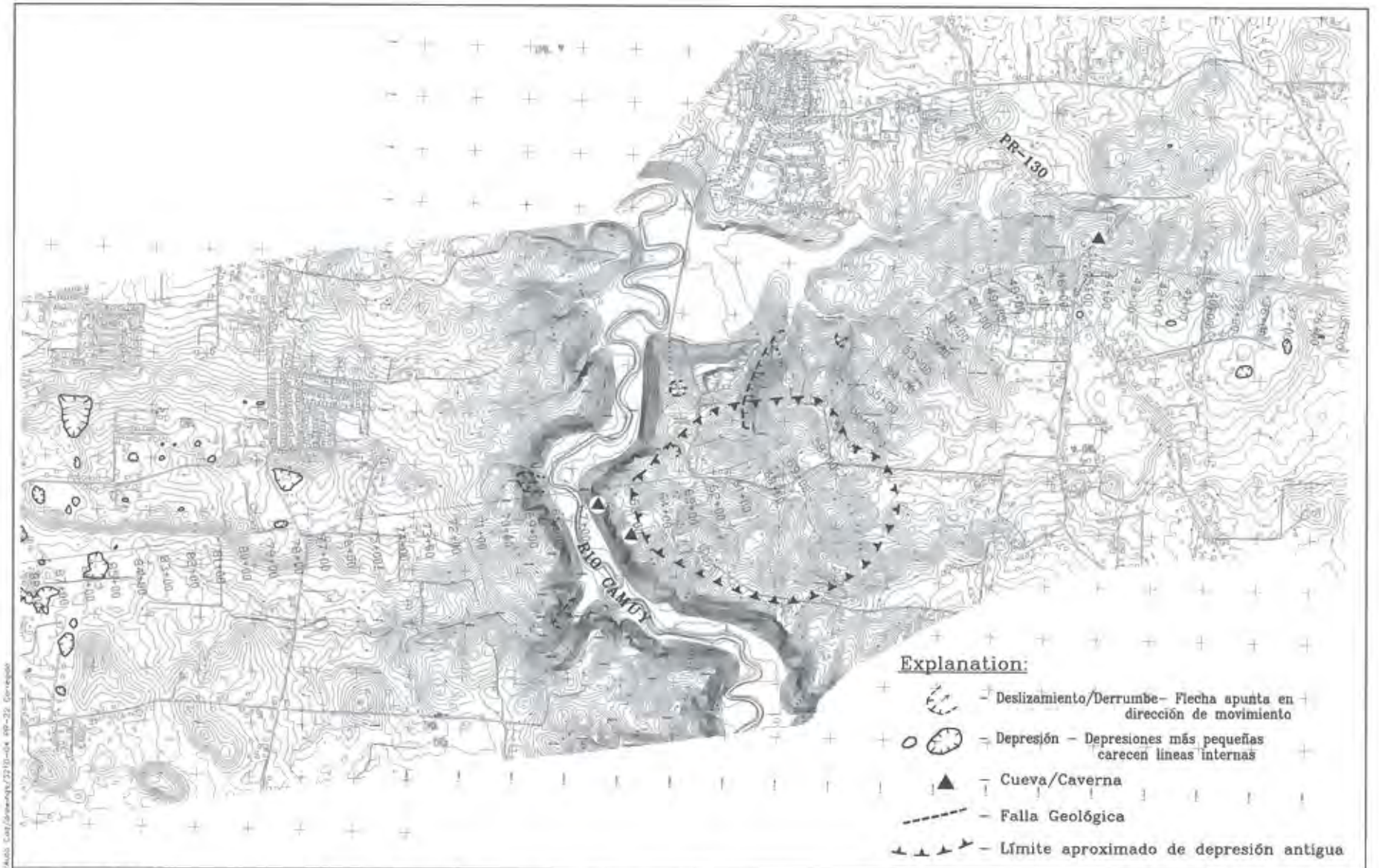
GeoCim

LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS
AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST.
GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007

Rasgos Superficiales Identificadas a lo largo del Corredor Hatillo-Aguadilla

Corredor Hatillo-Aguadilla

DATE	JOB NO.	DRG. BY	SCALE	DRW. BY	FIGURE NO.	SHEET
01/03/05	3210-04	A.S.	N.T.S.	G.O.G.	6	2



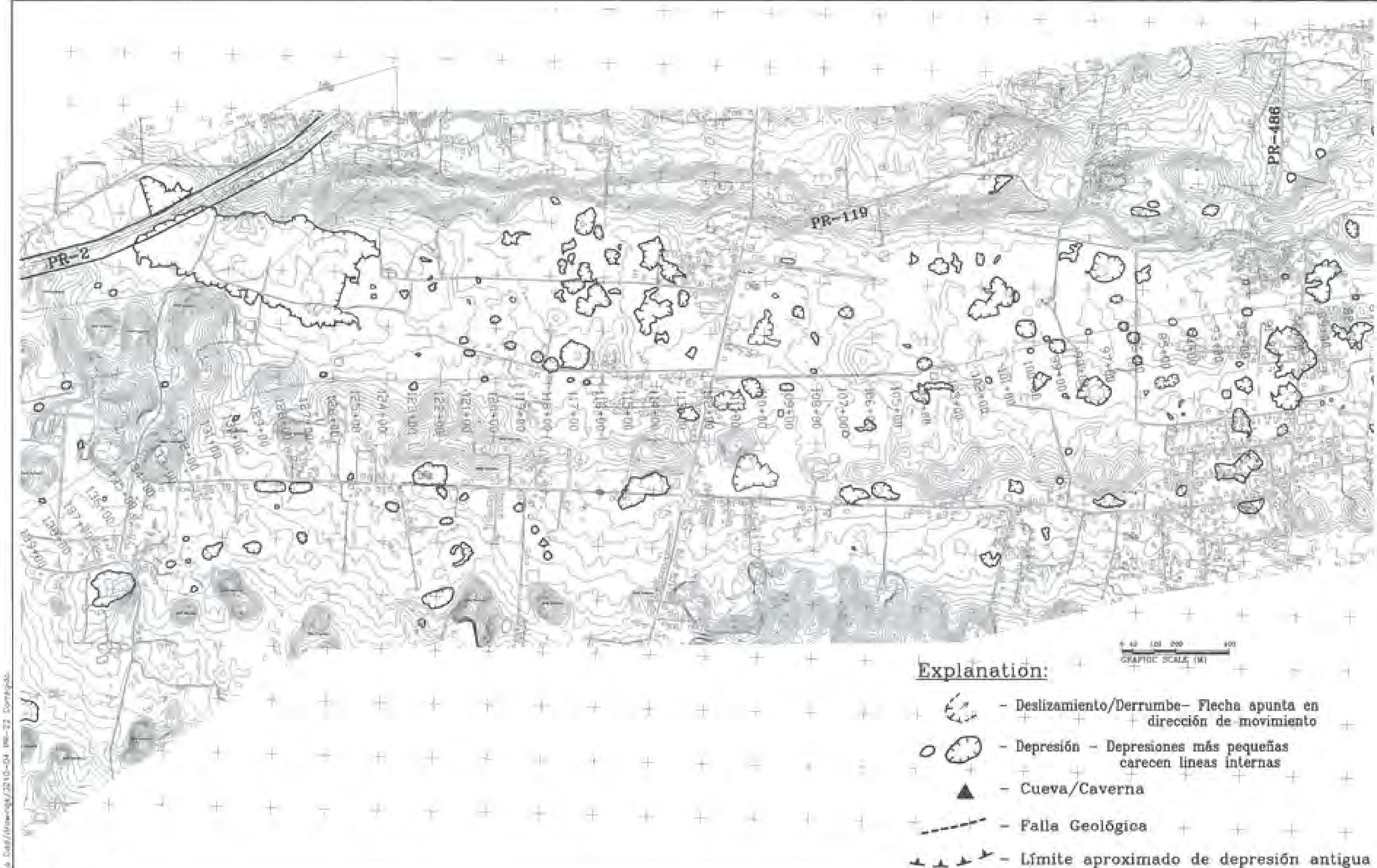
GeoCim

LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS
AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST.
GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007

Rasgos Superficiales Identificadas a lo largo del Corredor Hatillo-Aguadilla

Corredor Hatillo-Aguadilla

DRN. BY: G.D.G.	FIGURE NO: 6
DATE: 01/03/05	JOB NO: 3210-04
CHD. BY: A.S.	SCALE: N.T.S.
SHEET: 3	



GeoCim

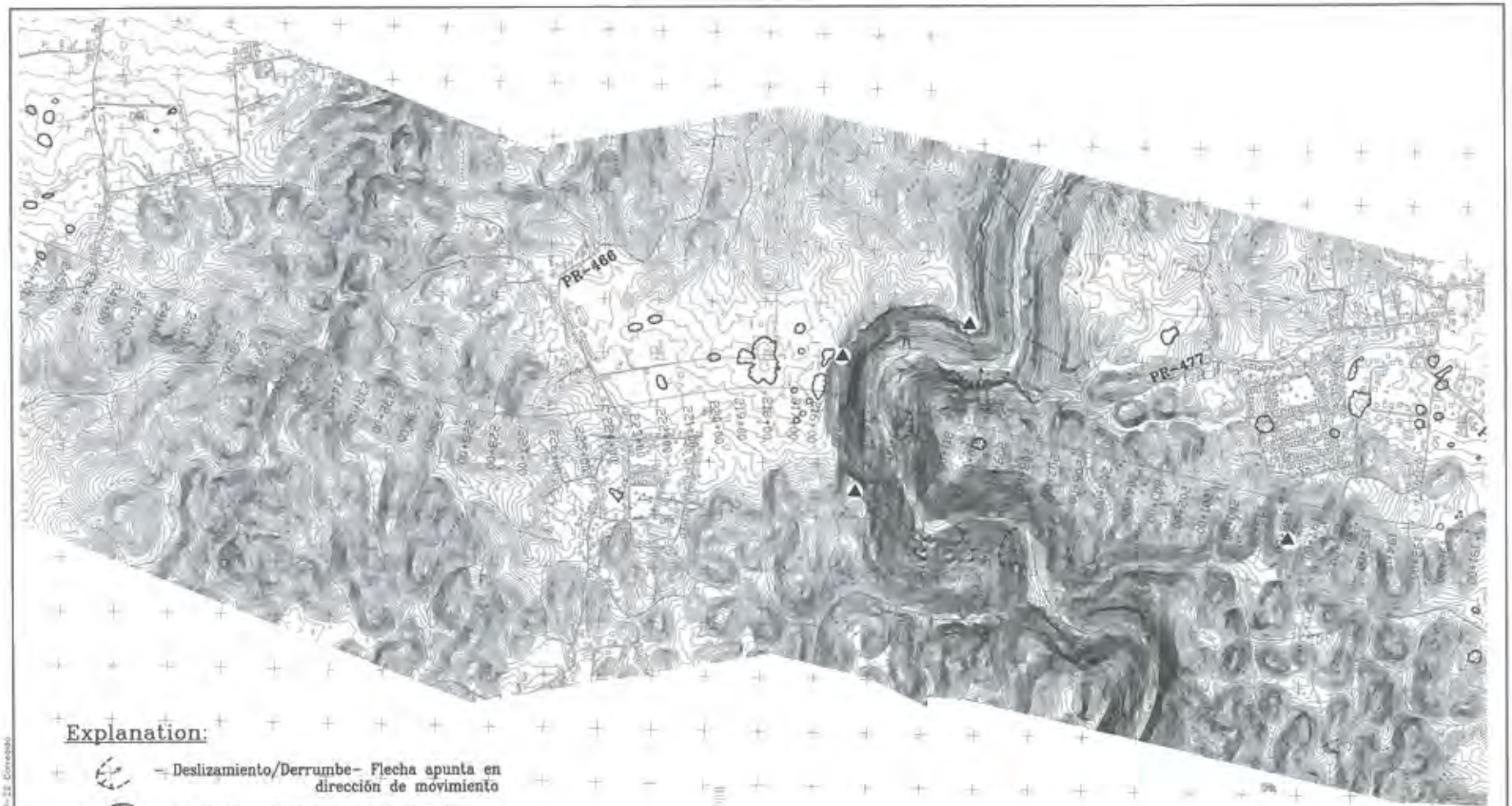
LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS
AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST.
GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007

Rasgos Superficiales Identificadas a lo largo del Corredor Hatillo-Aguadilla

Corredor Hatillo-Aguadilla

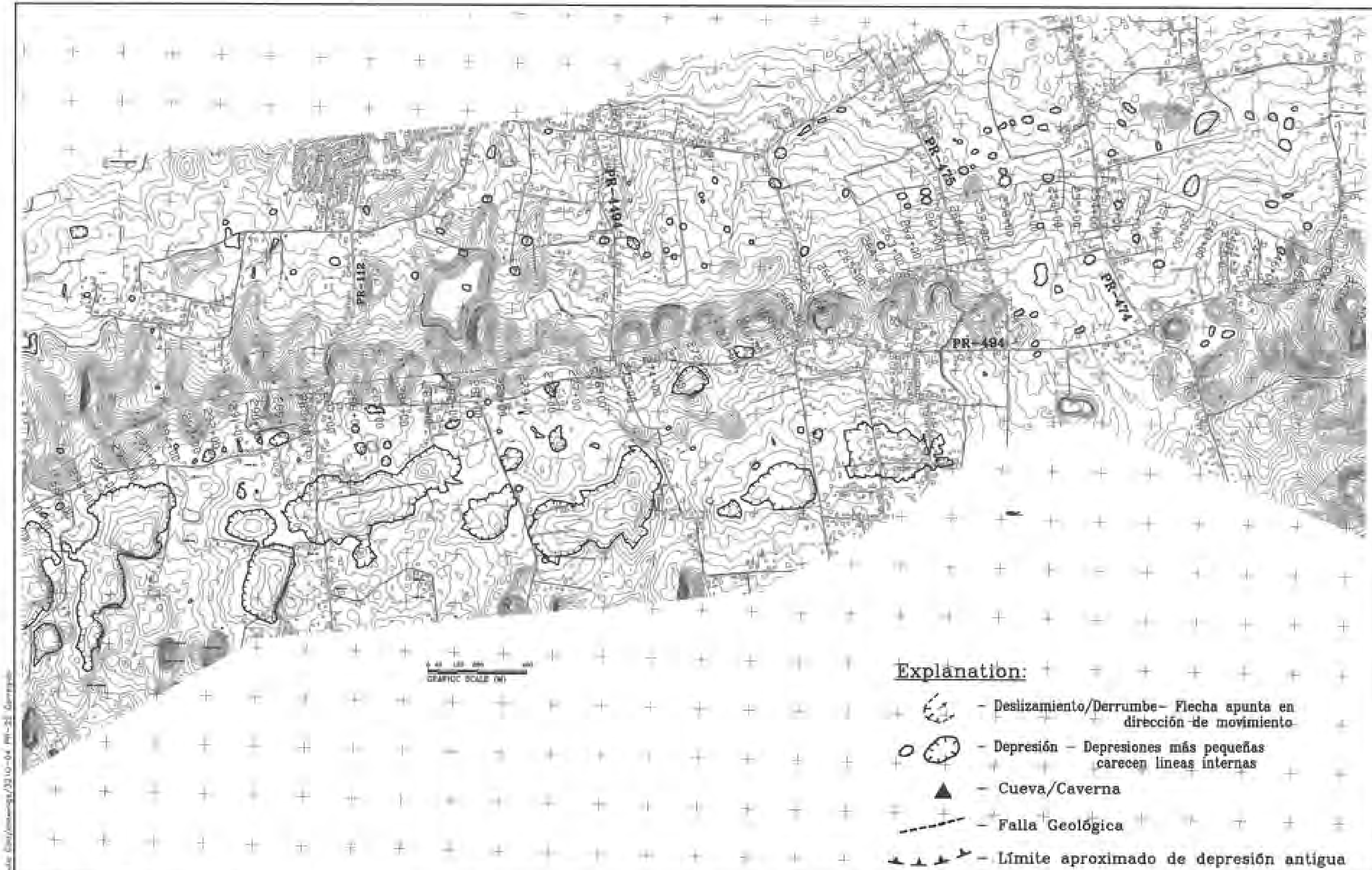
DATE: 01/03/05	JOB NO: 3210-04	CKD. BY: A.S.	SCALE: N.T.S.	DRW. BY: C.O.G.	FIGURE NO: 6	SHEET: 4	

GeoCim	LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST. GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007	Rasgos Superficiales Identificadas a lo largo del Corredor Hatillo-Aguadilla	Corredor Hatillo-Aguadilla				DRN. BY: G.O.G. FIGURE NO: 6 SHEET: 5
			DATE: 01/03/05	JOB NO: 3210-04	CHD. BY: A.S.	SCALE: N.T.S.	



GeoCim	LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST. GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007	Rasgos Superficiales Identificadas a lo largo del Corredor Hatillo–Aguadilla	Corredor Hatillo–Aguadilla			DRW. BY: G.O.C. FIGURE NO: 6 SHEET: 6
			DATE: 01/03/05	JOB NO: 3210–04	CKD. BY: A.S.	SCALE: N.T.S.

Document: F:/Autocad/drawings/3210-04 PR-22 Corredor



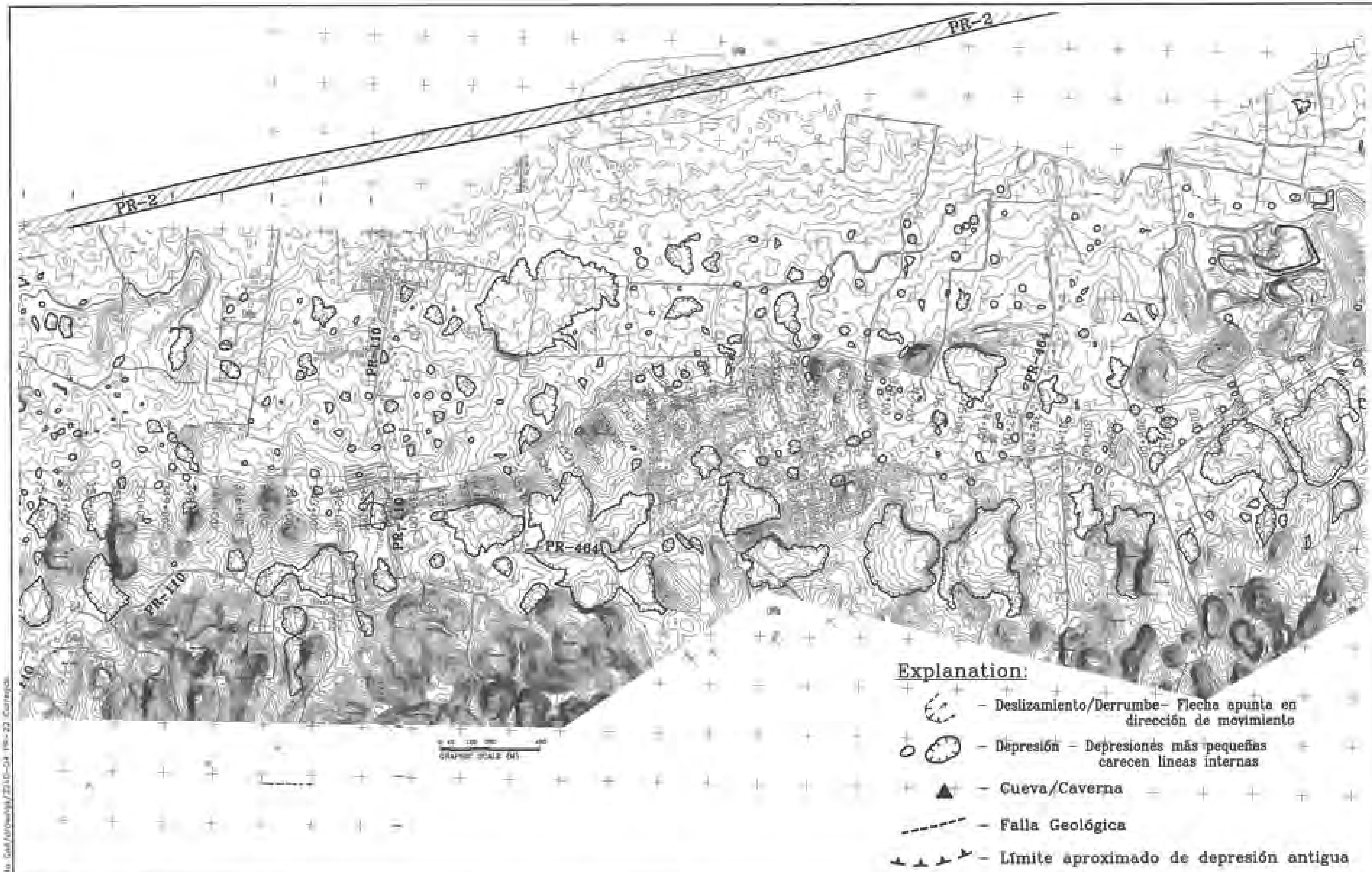
GeoCim

LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS
AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST.
GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-5007

Rasgos Superficiales Identificadas a lo largo del Corredor Hatillo-Aguadilla

Corredor Hatillo-Aguadilla

DRW. BY: G.O.G.	FIGURE NO: 6		
DATE: 01/03/05	JOB NO: 3210-04	CKD BY: A.S.	SCALE: N.T.S.
SHEET: 7			



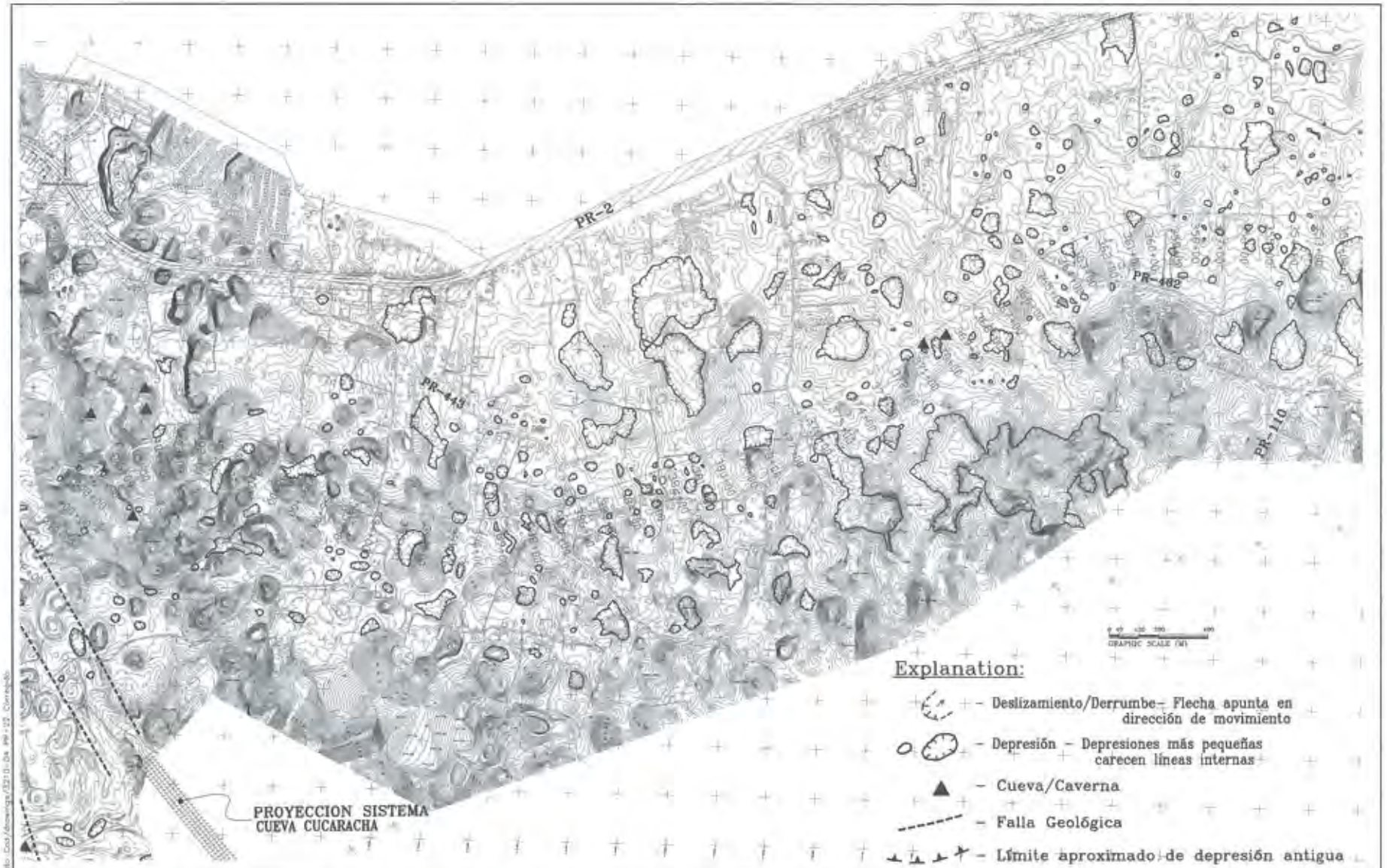
GeoCim

LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS
AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST
GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-5007

Rasgos Superficiales Identificadas a lo largo del Corredor Hatillo-Aguadilla

Corredor Hatillo-Aguadilla

DRN. BY:	C.O.G.
FIGURE NO:	6
DATE:	01/03/05
JOB NO:	3210-04
CHD. BY:	A.S.
SCALE:	N.T.S.
SHEET:	8



GeoCim

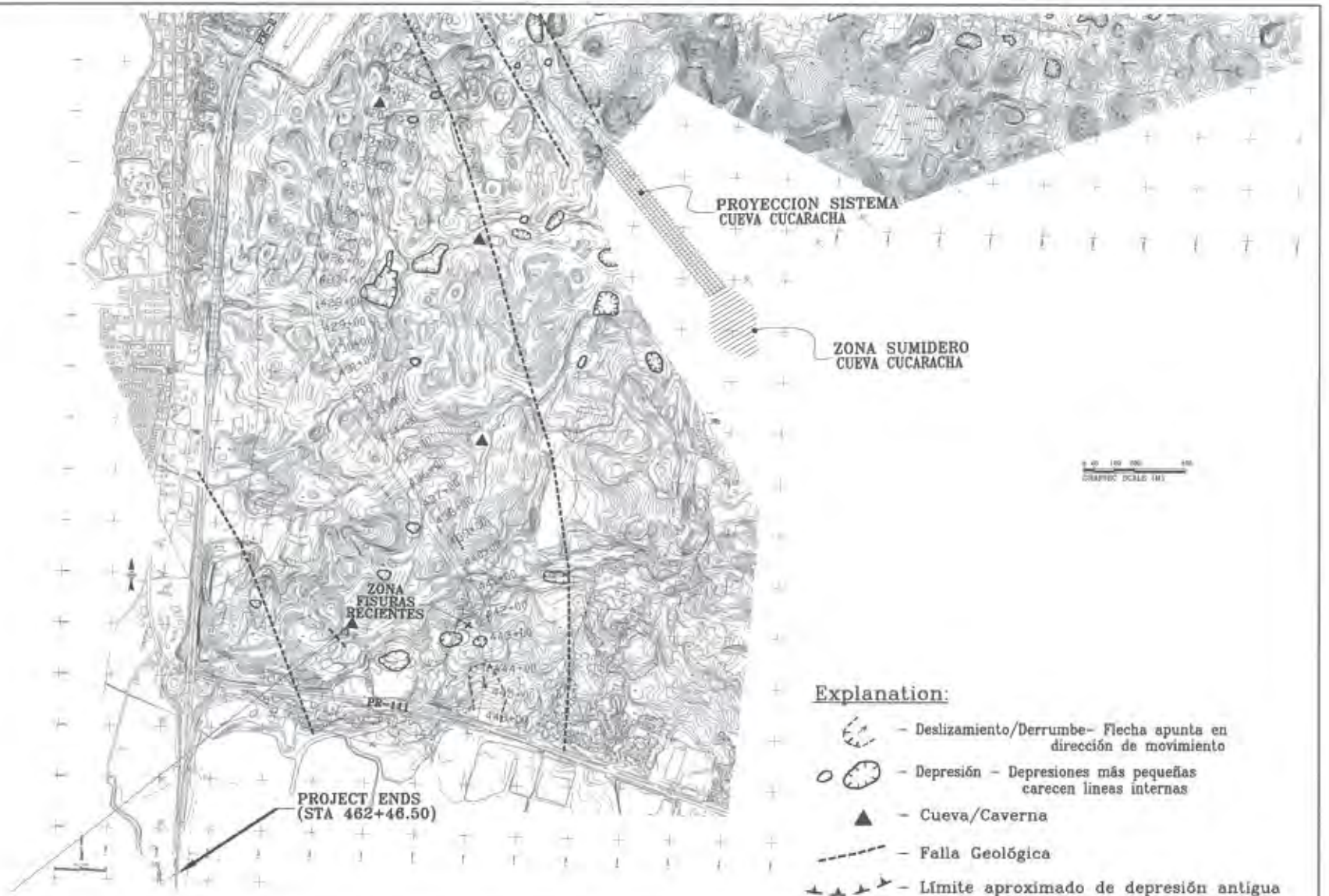
LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS
AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT 26 A EMMA ST.
GUAYNABO, PUERTO RICO 00966-8007

Rasgos Superficiales Identificadas a lo largo del Corredor Hatillo-Aguadilla

Corredor Hatillo-Aguadilla

DATE: 01/03/05 | JOB NO: 3210-04 | CKD. BY: A.S. | SCALE: N.T.S.

DRW. BY: C.O.G.
FIGURE NO: 6
SHEET: 9



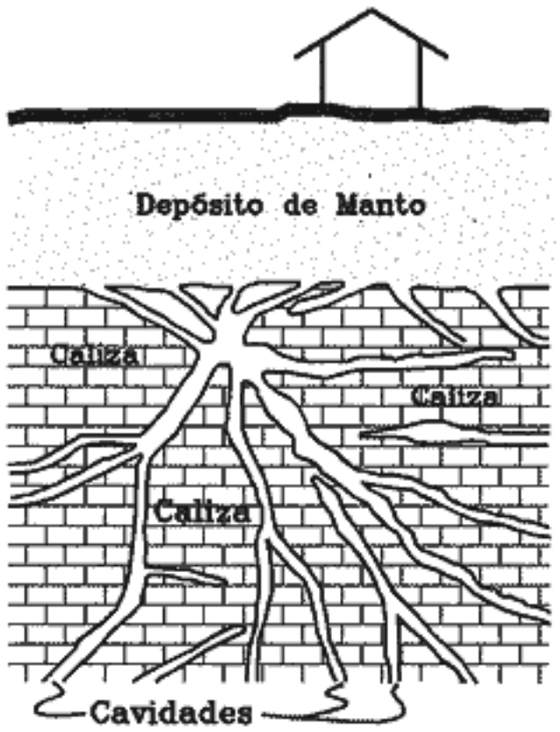
GeoCim

LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES
GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS
AMEJIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST.
GUAYNABO, PUERTO RICO 00966-3007

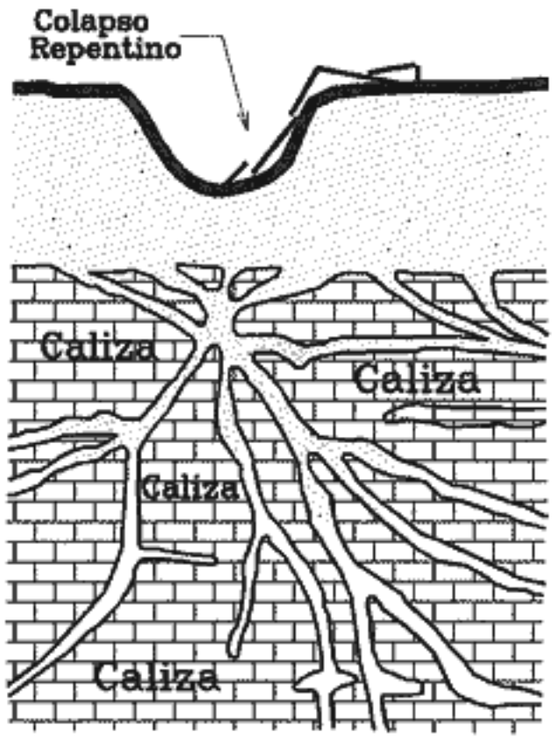
Rasgos Superficiales Identificadas a lo largo del Corredor Hatillo-Aguadilla

Corredor Hatillo-Aguadilla

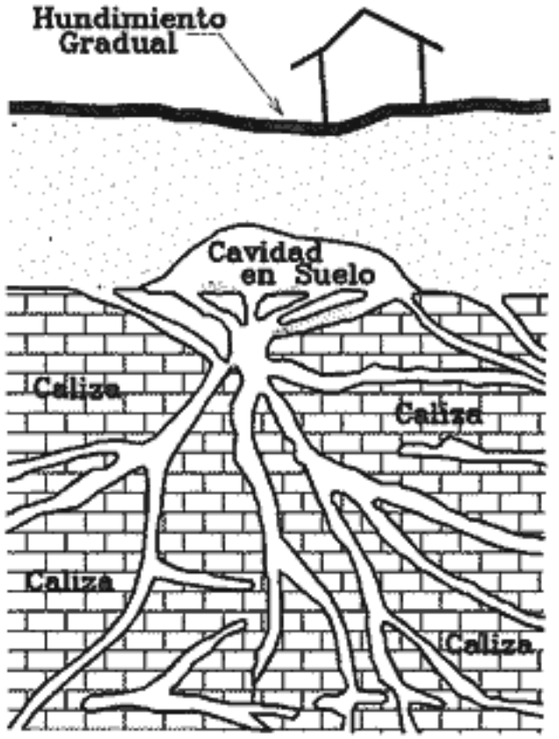
DRWN. BY: G.O.G.	FIGURE NO. 6
DATE: 01/03/05	JOB NO: 3210-04
CHK. BY: A.S.	SCALE: N.T.S.
SHEET: 10	



Fase 1: Condición Inicial



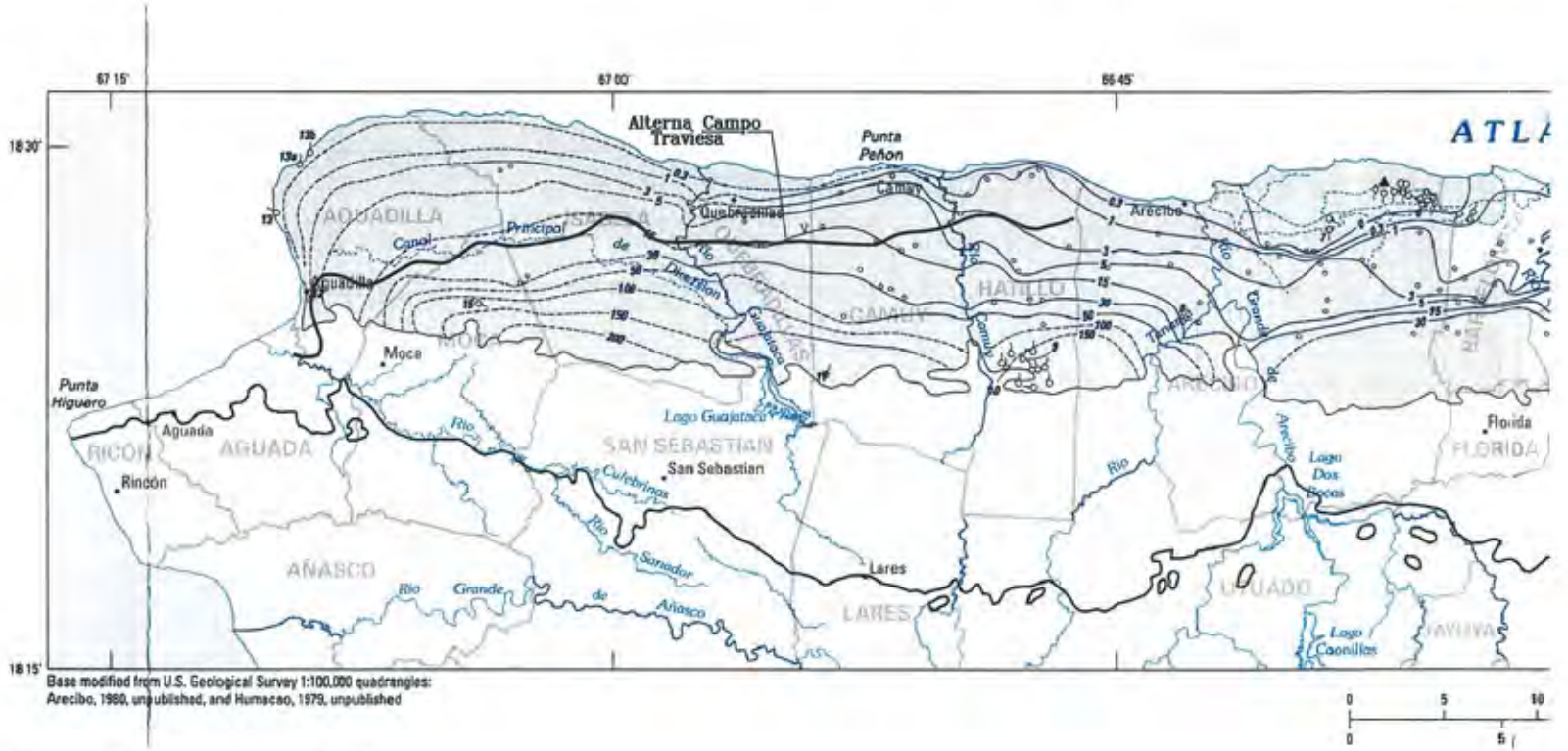
Fase 3: Colapso



Fase 2: Erosión gradual de suelo hacia cavidades en roca caliza crea cavidad sobre el contacto suelo-caliza

Fuente: Soto y Morales, 1984

GeoCim LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES	Ilustracion esquemática de la formación de un sumidero de colapso					
	Alterna Campo Traviesa (Corredor Hatillo-Aguadilla)					
	DRW. BY: G.O.G.	CKD. BY: A.S.	SCALE: N.T.S.	DATE: 12/29/05	JOB. NO: 3210-04	FIGURE NO: 7



Fuente: Rentgen y otros, 2002

GeoCim LUIS O. GARCIA & ASSOCIATES GEOTECHNICAL ENGINEERING CONSULTANTS AMELIA DISTRIBUTION CENTER LOT. 26 A EMMA ST. GUAYNABO, PUERTO RICO 00968-8007	Niveles potenciómetros en el acuífero freático entre 1980 y 1990, noroeste de Puerto Rico	Corredor Hatillo-Aguadilla			DRW. BY: G.O.G.
		DATE: 12/29/05	JOB NO: 3210-04	CKD. BY: A.S.	SCALE: N.T.S.	FIGURE NO: 8

Gowanis F:/Auto Cad/drawings/3210-04 PR-22/FIG 3-4-8